



TITLE:

岩石およびコンクリート中の微細な間隙や割れ目の可視化と評価に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

楠田, 啓

---

CITATION:

楠田, 啓. 岩石およびコンクリート中の微細な間隙や割れ目の可視化と評価に関する研究. 京都大学, 1995, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1995-09-25

URL:

<https://doi.org/10.11501/3106530>

RIGHT:

# 岩石およびコンクリート中の 微細な間隙や割れ目の可視化 と評価に関する研究

楠田 啓

岩石およびコンクリート中の  
微細な間隙や割れ目の可視化  
と評価に関する研究

平成7年

楠田 啓

# 目 次

第1章 緒論 .....	1
1.1 本研究の目的 .....	1
1.2 関連する従来の研究 .....	2
1.3 本論文の構成と内容の概観 .....	4
第2章 割れ目や間隙の可視化 .....	7
2.1 緒言 .....	7
2.2 樹脂の充填による割れ目や間隙の可視化 .....	7
2.2.1 樹脂の選択と蛍光剤および染料の添加 .....	7
2.2.2 蛍光法および染色法における樹脂の充填方法 .....	8
2.2.3 樹脂の浸透性 .....	13
2.3 カリ長石の染色による可視化 .....	13
2.4 可視化された割れ目や間隙の顕微鏡による観察 .....	15
2.5 岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の観察例 .....	17
2.6 結言 .....	23
第3章 割れ目や間隙の画像処理 .....	25
3.1 緒言 .....	25
3.2 画像処理システム .....	25
3.3 画像処理による割れ目や間隙の解析 .....	25
3.4 画像処理例 .....	31
3.4.1 微細な割れ目の抽出と解析 .....	31
3.4.2 微細な間隙の存在状況の表現と解析 .....	31
3.5 結言 .....	36
第4章 花崗岩の風化に伴う間隙および割れ目の可視化と評価 .....	38
4.1 緒言 .....	38
4.2 試料 .....	38
4.2.1 供試試料 .....	38
4.2.2 蛍光剤を添加した樹脂の充填 .....	38
4.3 実体顕微鏡および反射顕微鏡による観察 .....	40



4. 4	画像処理 .....	40
4. 4. 1	割れ目の抽出と長さの計測法 .....	40
4. 4. 2	鉱物粒子の風化程度の測定法 .....	40
4. 5	割れ目と間隙の観察結果と考察 .....	43
4. 5. 1	割れ目の長さと同隙率 .....	43
4. 5. 2	鉱物粒子内の同隙率の測定と風化程度の測定 .....	45
4. 6	結言 .....	49
第5章	花崗閃緑岩の風化に伴うカリ長石粒子の変化状況の可視化と評価 .....	51
5. 1	緒言 .....	51
5. 2	試料 .....	51
5. 3	画像処理によるカリ長石の抽出 .....	51
5. 4	風化に伴うカリ長石の変化 .....	54
5. 5	走査型電子顕微鏡による風化した長石粒子表面の観察 .....	57
5. 6	結言 .....	57
第6章	凝灰岩の経年変化による同隙および割れ目の可視化と評価 .....	61
6. 1	緒言 .....	61
6. 2	解析手法 .....	61
6. 2. 1	試料 .....	61
6. 2. 2	樹脂の充填と顕微鏡観察 .....	61
6. 3	風化機構と同隙の発達 .....	61
6. 3. 1	風化の進展 .....	61
6. 3. 2	割れ目の充填 .....	63
6. 3. 3	充填物質 .....	66
6. 3. 4	碎屑物 .....	66
6. 4	凝灰岩の劣化状況の評価 .....	70
6. 5	結言 .....	77
第7章	コンクリートの経年変化による同隙および割れ目の可視化と評価 .....	79
7. 1	緒言 .....	79
7. 2	試料の作製と顕微鏡観察 .....	79
7. 3	コンクリートの経年変化 .....	79
7. 4	劣化状況の評価 .....	80
7. 5	結言 .....	84

第8章 アルカリ骨材反応により形成される間隙および割れ目の可視化と アルカリ骨材反応性の評価 .....	91
8.1 緒言 .....	91
8.2 試料 .....	91
8.3 染色法および蛍光法によるアルカリ骨材反応の発生状況の顕微鏡観察 .....	93
8.3.1 染色法による偏光顕微鏡観察 .....	93
8.3.2 蛍光法による実体顕微鏡観察 .....	95
8.4 各種の試験法によるアルカリ骨材反応性の判定 .....	99
8.4.1 チャート質骨材の染色法による観察 .....	99
8.4.2 チャート質骨材中のX線粉末回折分析および示差熱分析 .....	99
8.4.3 画像処理によるモルタルバー試験片中の割れ目の計測 .....	99
8.4.4 フェロニッケルスラグの化学的反応性試験 .....	102
8.5 アルカリ骨材反応性の評価 .....	108
8.5.1 チャート質骨材のアルカリ骨材反応性の評価 .....	108
8.5.2 フェロニッケルスラグのアルカリ骨材反応性の評価 .....	111
8.6 結言 .....	111
第9章 軽量コンクリート中の気泡や間隙の可視化と凍結融解に対する耐久性の評価 .....	114
9.1 緒言 .....	114
9.2 試料 .....	114
9.3 セメントペースト中および軽量骨材コンクリート中の気泡の形状 .....	115
9.3.1 セメントペースト中の気泡の観察 .....	115
9.3.2 軽量骨材中の気泡の観察 .....	115
9.4 気泡や間隙の連続性 .....	115
9.5 軽量コンクリートの凍結融解に対する耐久性 .....	118
9.6 画像処理 .....	121
9.7 水と樹脂の浸透性の比較 .....	121
9.8 結言 .....	125
第10章 結論 .....	127
謝辞 .....	131

# 第1章 緒論

## 1. 1 本研究の目的

岩石やコンクリートの内部には、さまざまな原因によって形成された種々の割れ目や間隙が多数存在している。これらの割れ目や間隙は強度や耐久性に直接関連しているだけでなく、水の通路としての役割も担っている。したがって、岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の存在状況を的確に認識し評価することは、岩盤構造物を構築する際の基礎資料を提供するとともに、現在計画がすすめられている大規模地下空間の利用、大深度地下開発、放射性廃棄物の地層処分などの諸構想にも貢献するものである。

これまでの割れ目や間隙の研究をみると、肉眼あるいは顕微鏡により識別できるものに限定され、この他にも顕在化できない多数の割れ目や間隙の存在が推察されるにもかかわらず、これらを観察する具体的な手法は確立されていない。このため潜在割れ目に関する研究はほとんどなされていないのが現状である。たとえば、風化現象では物理的作用と化学的作用とが相伴って進み、岩石種や、温度、地下水の性質等の環境条件は、形成される割れ目や間隙にそれぞれ強く影響を及ぼすものと考えられる。そのため、割れ目や間隙の形成機構はきわめて複雑で種々の過程が想定され、現在顕在化されている現象の他に、初期段階で先行している多数の現象があるものと推察される。また、岩石の破壊においても同様で、肉眼で把握される破壊現象にいたるまでには種々の割れ目が潜在しているものと考えられる。これらは地質学的時間スケールにおいても、また比較的短期間のいずれにも起こっているものと推測される。このように、岩盤あるいはコンクリート構造物の風化機構、強度、破壊機構などを考察するうえでの潜在割れ目の情報量の不足は大きな障害となっている。

一方、地質情報は多岐多様にわたるものであり、調査、計測によって得られる情報は莫大な量に達し、これらの複雑に絡まった情報を迅速に、かつ適切に解きほぐす必要にせまられている。この情報処理の分野では、近年コンピュータによる解析が著しく発展し、大きな貢献をなしている。割れ目や間隙に関する研究でも、画像処理法による大きさや形状の認識、理解をはじめ、これまで定性的分析にとどまっていた視覚データを定量的分析へと発展させることに成

功している。

このような状況を考慮し、本研究では、潜在割れ目あるいは特定鉱物の可視化と可視化された割れ目あるいは特定鉱物の定量的評価の2つの研究課題を含んでいる。まず可視化では、あらかじめ蛍光剤あるいは染料を添加した樹脂を割れ目や間隙に充填させる方法と特定鉱物のみを選択的に染色する方法の2つを開発した。さらに、画像処理技術を利用して可視化された割れ目や間隙を迅速かつ定量的に測定し、これら进行评估することを試みた。研究対象としたのは、種々の原因による劣化現象によって割れ目や間隙が発達した花崗岩、花崗閃緑岩、凝灰岩の3種類の岩石と、地質工学においては人工岩石と位置づけられるコンクリートの計4種類である。なお、コンクリートについては、40～50年間という比較的長期間における経年劣化と、アルカリ骨材反応あるいは凍結融解反応などのごく短期間における劣化現象に分けて考察を行った。

## 1. 2 関連する従来の研究

岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の大きさや形状を定量的に評価するために、これまで次のような研究が行われてきている。

### (1) 光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡による研究

鉱物の光学的性質を利用した偏光顕微鏡観察や、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた微細な構造の観察は、岩石中の微細な割れ目や間隙の存在状況を調べるための有効な手段であり、多くの研究報告がみられる<sup>1)~10)</sup>。

これらのなかで、Krantz は、多数の走査型電子顕微鏡観察結果から微細な割れ目と鉱物粒子との関係について詳細な検討を行い、微小割れ目を粒子境界割れ目、粒子内割れ目、粒子間割れ目の3種類に区分した<sup>1)</sup>。さらに、金折らは光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡観察から、花崗岩類岩石にみられる多種多様の微小変形構造の分類を行うとともに、SEM像だけでなく反射電子像 (BSE 像) を利用して鉱物種の違いをとらえることで微小割れ目とその存在状況をより明確にした<sup>2~4)</sup>。また Homand-Etienne, F. と Troalen, J.P. は花崗岩および石灰岩の加熱実験により発生する微細な割れ目の進展状況を走査型電子顕微鏡により詳細に観察した<sup>5)</sup>。一方、西田は偏光顕微鏡観察による花崗岩の風化産物の間隙構造に関する研究を行い、風化の程度に応じて種々の特異な構造、

組織を示すことを報告している<sup>6)</sup>。

## (2) 岩石中の割れ目を染色し、可視化する方法

肉眼観察や光学顕微鏡観察における割れ目の識別を容易にするために、岩石中の割れ目を試薬によって染色する方法が考案されている。たとえば、鈴木らは、花崗岩中の微小な間隙を  $\text{KMnO}_4$  水溶液の毛管上昇により染色して、割れ目や間隙の空間的な存在状況を可視化することを試みている<sup>11)</sup>。また、材料の非破壊検査の分野では浸透探傷試験法<sup>12)</sup>として、染色による割れ目の可視化が行われている。しかしながらこれらの方法はいずれも試薬の浸透性から、観察対象が 0.1mm オーダー以上の割れ目が限界で、微細な割れ目 ( $\mu\text{m}$  オーダー) の識別は困難な状況である。

## (3) 物理的な手法により割れ目や間隙の量を把握する方法

割れ目や間隙を直接的に把握することは多くの経験と労力を必要とすることから、物理的手法を利用して間接的に岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の大きさあるいは量を推測する方法もしばしば利用されている。たとえば、水銀ポロシメータを用いると間隙の大きさとその分布状況を調べることができる。西田らは、風化花崗岩中の間隙の大きさは  $50\mu\text{m}$  から  $0.01\mu\text{m}$  まで広く分布することを示した<sup>13)</sup>。また、有効間隙率や吸水率を測定することで間隙の量を推察する方法はよく利用されている。しかしながら、これらの方法は測定に時間がかかり、さらに材料内における間隙の存在状況を詳細に知ることは困難である。この他、P波伝播速度もしばしば利用されるが、割れ目の位置や大きさを十分に認識できないことと、劣化が進んだ割れ目の多い試料には適用不可能という欠点がある。

## (4) 情報処理技術を利用する方法

応用地質学の分野に情報処理の技術を応用した初期の研究としては、武内らによる地図情報の数値化の研究<sup>14)</sup>があげられる。その後、この分野は数理地質学あるいは情報地質学として発展し、塩野ら<sup>15)</sup>、山田ら<sup>16)</sup>、正路<sup>17)</sup>、小池ら<sup>18)</sup>などにより、パーソナルコンピュータを利用した地質情報処理に関する研究が種々行われてきている。最近ではパーソナルコンピュータを用い、多量

の情報をデータベース化して処理する研究も行われるようになってきた<sup>19) 20)</sup>。また、このような情報処理の技術と、近年発展してきた画像処理の技術とを結び付けることにより、画像処理法の地質学への応用も行われるようになってきている。手塚ら<sup>21)</sup>や小池ら<sup>18)</sup>、橋本ら<sup>22)</sup>は比較的規模の大きい構造や割れ目の抽出および評価を試みている。しかしながら、岩石やコンクリート中の割れ目や間隙のような微細な構造に画像処理の技術を利用した例<sup>23)</sup>はほとんどみられない。

### 1. 3 本論文の構成と内容の概観

本論文は、岩石やコンクリート中に形成されている種々の微細な割れ目や間隙を、蛍光法や染色法によって可視化することにより鮮明に認識し、さらに画像処理法を組み合わせることによってこれらを定量的に評価する方法をとりまとめたものであり、緒論と結論の他8章で構成されている。第2章では微細な割れ目や間隙を可視化する方法として用いた蛍光法あるいは染色法における試料の作製方法、樹脂の浸透性について、第3章では画像解析システムと画像処理の手法について考察した。第4章では蛍光法および染色法により花崗岩中の間隙や割れ目の発達状況について、第5章ではカリ長石粒子を染色することにより、長石粒子内における割れ目の発達と風化のプロセスについて考察した。第6章では、凝灰岩の経年変化、第7章ではコンクリートの経年変化による間隙および割れ目について検討した。第8章ではアルカリ骨材反応によってコンクリート中に発生したひび割れと骨材の反応性の評価について、チャート質骨材とフェロニッケルスラグについて考察した。第9章では軽量コンクリートの凍結融解に対する耐久性に関連する気泡や割れ目について考察した。

### 参考文献

- 1)Kranz,R.L. : Microcracks in Rocks, Tectonophysics, 100, 449–481, (1983)
- 2) 金折裕司：花崗岩類にみられる微小変形構造，日本応用地質学会平成元年度研究発表会講演論文集，21–24, (1989)
- 3)Kanaori, Y., Miyakoshi, K., Kakuta, T. and Satake, Y. : Characteristics of intrafault materials within the Atotsugawa fault of central Japan, Engineering

- Geol., 16, 243–262, (1981)
- 4) Kanaori, Y. : Fracturing mode analysis and relative age dating of faults by surface textures of quartz grains from fault gouges, Engineering Geol., 19, 261–281, (1983)
  - 5) Homand–E, F. and Troalen, J. P. : Behavior of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes, Engineering Geol., 20, 219–233, (1984)
  - 6) 西田一彦 : 風化残積土の工学的性質, 鹿島出版会, (1986)
  - 7) 嘉門雅夫 : 土質の立場からみたマサ土の風化, 文部省科研費報告書「マサ土地帯における土砂災害の予測と防止に関する研究」, 32–33, (1989)
  - 8) 渡辺邦夫・関陽太郎 : 花崗岩風化に関与する地下水流れの基礎的性質, 岩石鉱物鉱床学会誌, 77[No.2], 37–46, (1982)
  - 9) Idorn, G. M. : Durability of Concrete Structure in Denmark, Thesis of Doctor of Science, 82–169, (1967)
  - 10) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二 : 花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布, 土質工学会論文集, 370, 189–197, (1986)
  - 11) 鈴木隆次・中嶋悟・永野哲志・喜多治之 : 花崗岩中における物質移動経路としての微小間隙の存在状態, 鉱山地質, 39[No.6], 349–354, (1989)
  - 12) JIS Z 2343 : 浸透探傷試験方法及び欠陥指示模様の等級分類, 日本規格協会, (1982)
  - 13) 西田一彦・青山千彰 : 花こう岩風化層の間隙径分布と水分吸着特性について, 応用地質, 20[No.1], 3–12, (1979)
  - 14) 武内寿久編 : 秋田県北鹿地域の地質構造図ーコンピュータによる地質構造解析の一例ー, 日本鉱業会, 1–38, (1981)
  - 15) 塩野清治・弘海原 清・升本眞二 : パソコンによる格子データのコンターマップ作成プログラム, 情報地質, No.10, 65–104, (1985)
  - 16) 山田俊雄・黒田 望 : 資源開発とグラフィックス, コンピュートロール, No.5, 82–93, (1984)
  - 17) 正路徹也 : ステレオ投影の原理を理解するための対話型立体視システム, 情報地質, No.14B, 151–176, (1989)
  - 18) 小池克明・伊藤博之・大見美智人 : リニアメント解析のためのランドサッ

トTMデータの画像処理法に関する基礎的検討, 情報地質, No.14B,  
25-40, (1989)

- 19) 西山 孝・伊藤俊秀・楠田 啓: パーソナルコンピュータを用いた鉱物資  
源データベース, 資源と素材, 106[No.7], 407-412, (1990)
- 20) 小池克明・西山 孝・大見美智人・清水信宏: 地盤構造解析へのボーリン  
グデータベースの応用, 情報地質, No.14B, 11-24, (1989)
- 21) 手塚裕樹・川崎逸郎: SPOT 画像による地形分類のためのテクスチャ解析  
手法について, 日本測量学会学術講演会発表論文集, 195-200, (1989)
- 22) 橋本文作・佐藤高史・本多 真: 画像処理技術を用いた岩盤割れ目の調査  
システム, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 73-78, (1990)
- 23) 中村雅彦・大西孝明・神谷昌岳: 無機建材の耐凍害性に関する細孔の定量  
形態学的解析, 日本セラミックス協会学術論文集, 89[No.11], 37-41, (1991)



## 第2章 割れ目や間隙の可視化と観察

### 2. 1 緒言

岩石やコンクリート中の微細な割れ目や間隙の存在状況を詳細に検討するためには、光学的に特徴の少ない微細な割れ目や間隙をあらかじめ可視化し、観察を容易にすることが望ましい。そこで、2つの方法により可視化を試みた。その一つは、あらかじめ蛍光剤や染料を添加した樹脂を浸透、固化させ、紫外線を照射することにより可視化する方法<sup>1-7)</sup>で、もう一つは化学反応により特定鉱物のみを着色させることによって可視化する方法である<sup>8-9)</sup>。次にこれらの方法と観察例を示す。

### 2. 2 樹脂の充填による割れ目や間隙の可視化

岩石やコンクリート中の微細な割れ目や間隙を可視化するのに適した樹脂と、樹脂の充填方法は以下のとおりである。

#### 2. 2. 1 樹脂の選択と蛍光剤および染料の添加

微細な割れ目や間隙の部分を鮮明に識別するためには、割れ目や間隙の部分とそれ以外の部分との色調や濃淡の差を顕著にすることが有効である。そのため、水溶性や油性の染料の使用がまず考えられる。しかしながら、これらの材料は試料を乾燥させると染料の固定が困難であり、詳細な観察はできない。したがって、蛍光剤や染料を添加した樹脂を用いることにより、割れ目や間隙の内部を充填することが考えられる。充填する樹脂としては、微細な割れ目や間隙の観察を可能とするために、浸透性の優れていることと、染料や蛍光剤とのなじみが良好なことが必要である。近年さまざまな目的に対応した樹脂が開発されており、粘性が低く、浸透性の優れたものも数多く開発されている。本研究では、まず薄片作製の際にも用いられるシアノアクリレートを選択した。この樹脂は、試料表面における浸透性がよく、かつ染料や蛍光剤とのなじみも優れている。したがって、観察の対象とする試料の表面に存在している割れ目や間隙の状況を観察するのに優れている。しかしながら、浸透深度が比較的浅いので試料の観察はできない。そこで、次にシアノアクリレートよりさらに浸透

性が優れ、かつ取り扱いも容易なメチルメタアクリレートを採用した。この両者の樹脂を比較してみると、浸透性はメチルメタアクリレートの方が強く、蛍光剤とのなじみはシアノアクリレートの方が良好である。これらの樹脂の特性を生かし、もっとも微細な割れ目には浸透性のよいメチルメタアクリレートを、比較的大きな割れ目や間隙にはシアノアクリレートを用いた。また、試料全体に微細な間隙が存在し、その中に大きな割れ目や間隙が混存する場合は、最初にシアノアクリレートを用いると比較的大きな割れ目が、次にメチルメタアクリレートを用いると微細な間隙の可視化ができる。またアルカリ骨材反応の観察ではとくに反応性鋁物の同定が重要であるので、着色したシアノアクリレートを用いて偏光顕微鏡で観察できるように薄片を作製した。

これらの関係をまとめると表 2-1 のようになる。

## 2. 2. 2 蛍光法および染色法における樹脂の充填方法

樹脂の充填にはそれぞれの樹脂の性質および割れ目や間隙の特性を考慮し、次のような 3 つの方法を考えた。

### (1) 試料表面から比較的大きな割れ目や間隙へのシアノアクリレートの充填

シアノアクリレートを整形された試料の表面に充填する方法は以下のとおりである（図 2-1）。

- ①試料をダイヤモンドカッターで切断し、研磨する。
- ②研磨した面にシアノアクリレートを塗布し、放置する。
- ③樹脂が完全に硬化したのを確認して、注意深く再研磨し、余分な樹脂を除去する。

この方法は試料の表面から樹脂を浸透させる点に特徴があり、瞬間接着剤として広く用いられているシアノアクリレート（商品名アロンアルファ、シアノボンドなど）の浸透は浅い部分に限られ、後に述べるメチルメタアクリレートに比べると深部へは浸透しない。また、染料や蛍光剤の添加によって硬化時間は半日程度となり、それだけ割れ目や間隙への浸透時間を長くすることができるが、その反面、樹脂のライフタイムが短くなるという欠点も生じる。

### (2) 堅固な試料の外部からのメチルメタアクリレート（高温硬化型）の充填

表2-1 割れ目や間隙の可視化に用いた樹脂の特徴と問題点

	添加剤	浸透性	樹脂の浸透法	試料作製時における問題点	画像処理における問題点	適用性
シアノアクリレート	赤色染料	比較的大きな割れ目や間隙にはよく浸透するが、微細な間隙には浸透しにくい。	試料を切断・研磨した後にシアノアクリレートを塗布し、再度研磨する。	試料を最初に切断する際にできる割れ目と初成割れ目との区別ができない。	赤色の程度が漸移することがある。黒雲母などの類似の色を呈する鉱物があると画像処理が困難になる。	偏光顕微鏡を必要とする試料（たとえば、アルカリ骨材反応を起こしたコンクリートなど）。
	蛍光剤（黄色）	比較的大きな割れ目や間隙にはよく浸透するが、微細な間隙には浸透しにくい。	試料を切断・研磨した後にシアノアクリレートを塗布し、再度研磨する。	試料を最初に切断する際にできる割れ目と初成割れ目との区別ができない。	樹脂の発光は強く、画像処理は容易。	比較的大きな割れ目や間隙の解析（たとえば、コンクリート中の種々の組織の解析など）。
メチルメタクリレート（高温硬化型）	蛍光剤（紫色）	微細な間隙にまでよく浸透する。	試料を樹脂中に浸し、十分に浸透させる。その後、昇温し樹脂を固化させ、切断・研磨する。	樹脂を固化させる際、高温により割れ目が形成されることがある。ただし、新たに形成される割れ目には樹脂は充填されないので初成割れ目との区別は容易。	微細な間隙を観察するときには強力な紫外線装置が、また画像処理には高感度のCCDカメラが必要。	微細な割れ目や間隙の解析（たとえば、岩石の風化作用によって形成される微細な間隙の解析など）。
	蛍光剤（紫色）	最初は浸透性はよいが、時間とともに粘性が増大し、浸透性が低下する。	試料を樹脂中に浸し、放置する。固化した後、切断・研磨する。	樹脂の硬化の程度にむらがあり、試料の切断・研磨が困難なことがある。	微細な間隙を観察するときには強力な紫外線装置が、また画像処理には高感度のCCDカメラが必要。	脆弱な試料（たとえば、マサ土に近い風化花崗岩中の間隙の解析など）。

試料の内部に存在している微細な割れ目や間隙には、以下のような手順で高温硬化型のメチルメタアクリレートを充填させた（図 2-2）。

- ①蓋のできる容器にメチルメタアクリレートを入れ、その中に試料を浸す。
- ②減圧を適宜繰り返しながら 2 日程度放置する。
- ③蓋をして 50 ～ 100℃に加熱し、メチルメタアクリレートを硬化させる。この際急激に加熱するとしばしば発泡が起こるので、できるだけゆっくりと加熱し固化させることが必要である。
- ④試料をダイヤモンドカッターで切断し、研磨する。

メチルメタアクリレートは浸透性がきわめてよいので、試料の外部と連続し、かつ内部に分布している微細な割れ目や間隙にまで十分に充填させることができるという長所がある。その反面、硬化させる際に 100℃近くまで試料の温度を上昇させるために、固化の際に樹脂が収縮し、新たな亀裂が発生することがある。しかしながら、形成される新しい割れ目は樹脂の浸透後にできるので、新しい割れ目の部分は空隙として残り、初成の割れ目とは区別が可能である。

### (3) 脆弱な試料の外部からのメチルメタアクリレート（常温硬化型）の充填

高温硬化型のメチルメタアクリレートは、先に述べたように高温で硬化する際に樹脂の発泡がしばしばみられ、脆弱な試料では破壊される恐れがある。そこで、試料内部を高温硬化型のメチルメタアクリレートで充填させ、試料外部を常温で硬化し、発泡も少ないメチルメタアクリレートにより固化させる方法を考案した。この場合、有機過酸化物と還元剤からなる 2 種のメチルメタアクリレートを混合させることにより 1 時間程度で固化する（図 2-3）。

- ①試料の崩壊を防止するために、側面および底面をエポキシ樹脂とアルミニウム板で固定する。
- ②自然乾燥させ、試料中の水分を除去する。
- ③容器に試料を入れ、減圧しながら高温硬化型のメチルメタアクリレートを滴下し、試料内部にメチルメタアクリレートを浸透させる。
- ④減圧状態で半日程度放置した後、常温硬化型のメチルメタアクリレートの入った容器中に試料をすばやく移す。
- ⑤試料周囲の常温硬化型のメチルメタアクリレートが完全に固化した後に、50 ～ 100℃に加熱し試料内部の高温硬化型のメチルメタアクリレートを固化させ

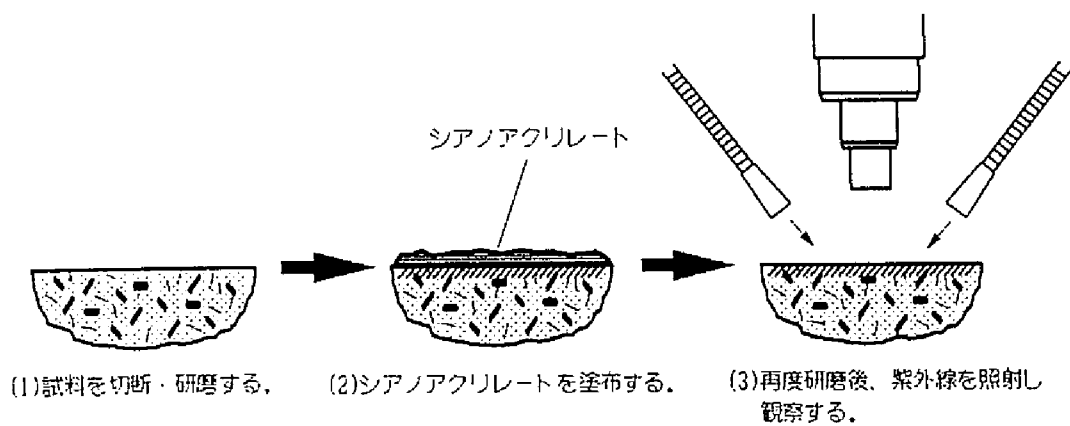


図2-1 シアノアクリレートの充填方法

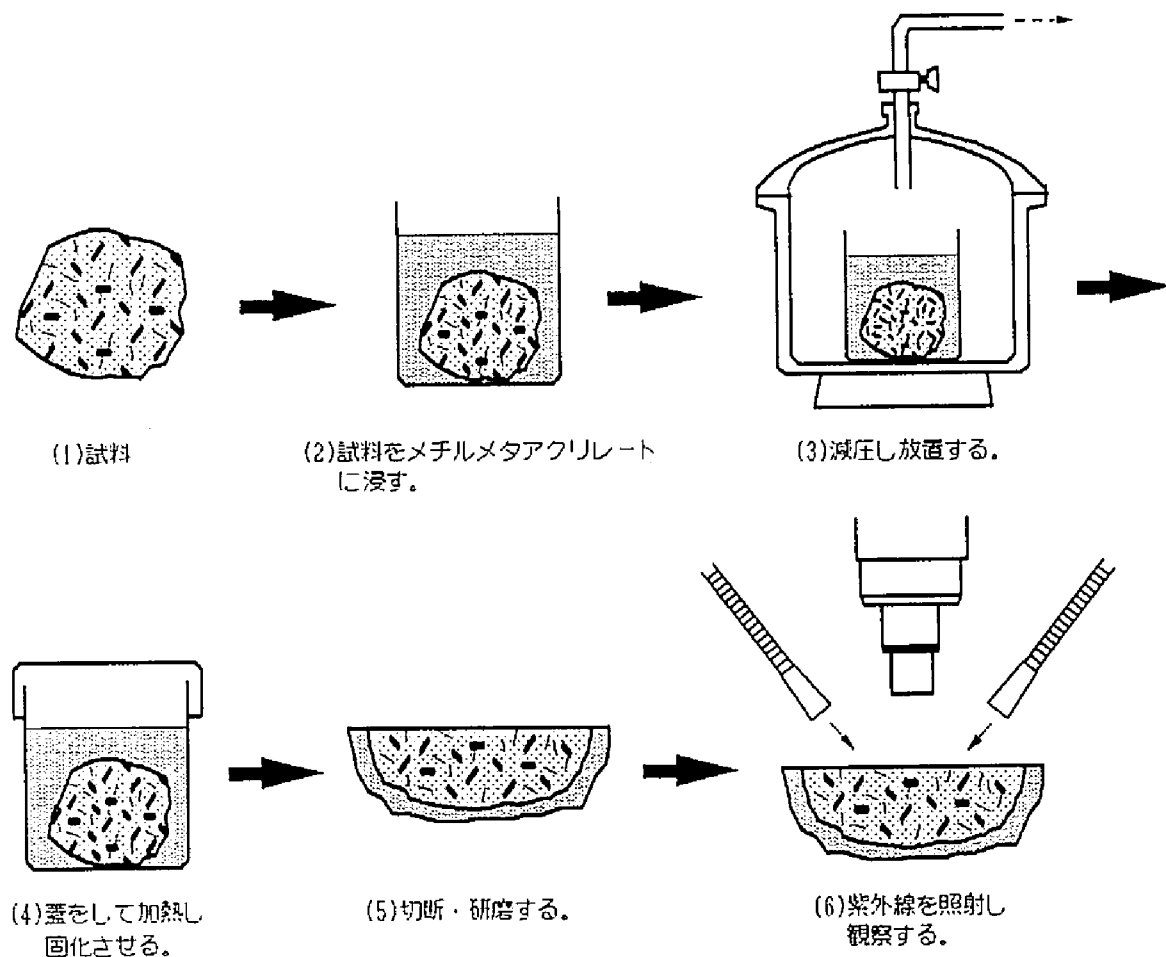


図2-2 メチルメタアクリレート（高温硬化型）の充填方法

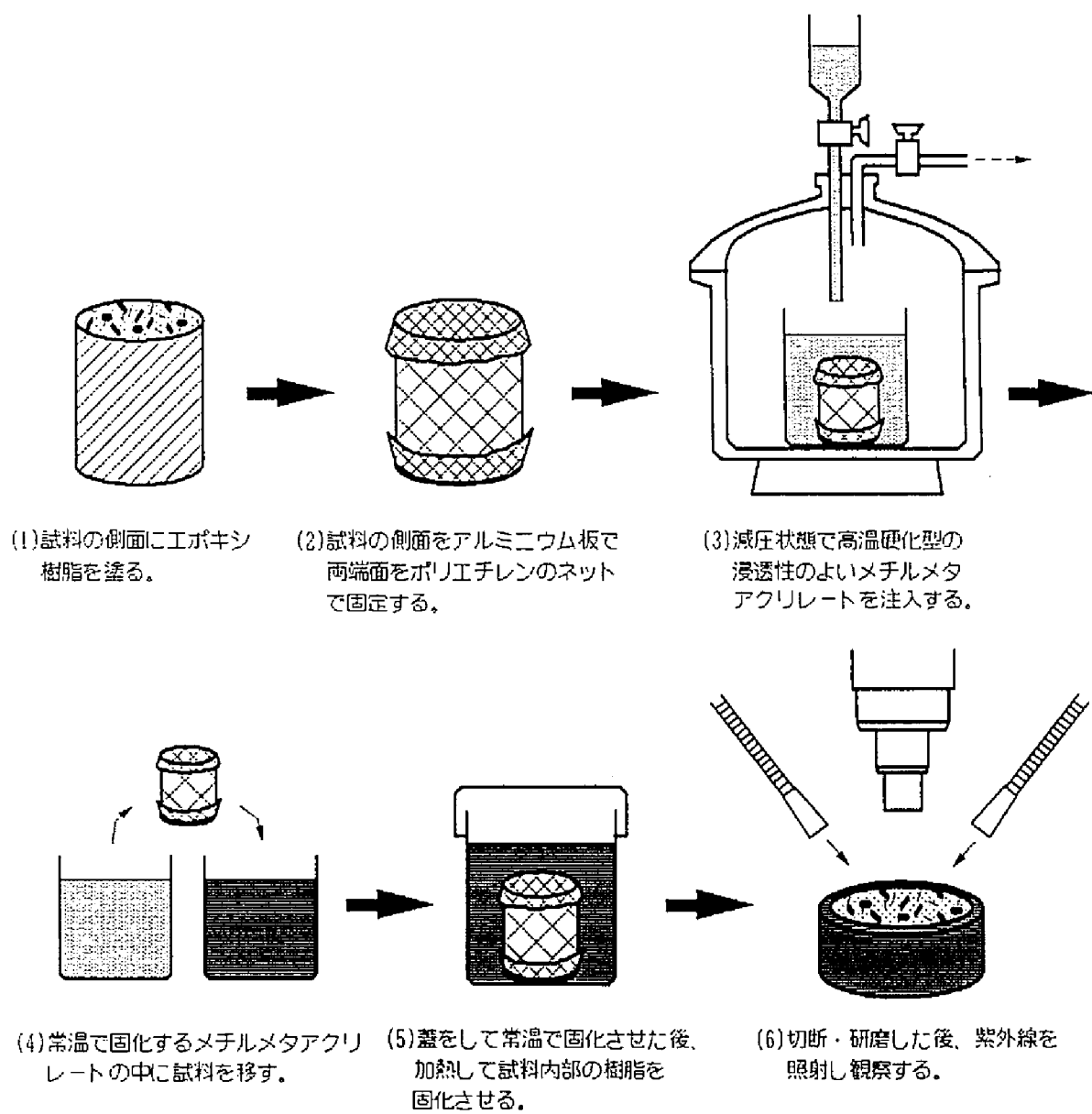


図2-3 メチルメタクリレート（常温硬化型）の充填方法

る。

⑥試料をダイヤモンドカッターで切断し、研磨する。

2液硬化型メチルメタアクリレートを用いると脆弱な試料へも充填が可能であるが、硬化時間が1時間程度と短いために微細な割れ目や間隙へ樹脂を十分に浸透させることは困難である。また、固化後の樹脂の硬度も低いので整形もしにくい。そこで、浸透性のよい高温硬化型の樹脂と併用し、まず高温硬化型の樹脂を微細な間隙へ十分に浸透させた後に、常温硬化型の2液のメチルメタアクリレートで試料の周囲を硬化、固定させ、次に温度を上げることによって内部の微細な割れ目や間隙に入っている高温硬化型の樹脂を硬化させる。この方法により風化などにより脆弱となった試料内部の微細な間隙に樹脂を充填させた試料を作製することができる。

### 2. 2. 3 樹脂の浸透性

メチルメタアクリレートは浸透性の優れた樹脂であるが、岩石中の微細な間隙（毛細管）へどのように浸透するかを調べるために、 $\phi 5\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ に成形した試料の下端を蛍光剤を添加したメチルメタアクリレートに浸し、減圧状態のもとで一定時間放置し、観察した（図2-4A）。図2-4B, C, Dは、花崗岩（京都府北白川産）について樹脂の浸透の様子を観察したもので、粒子間あるいは粒子内にできた無数の間隙に沿って比較的一様に下部から樹脂が浸透している。浸透速度は、最初の0.5時間後で約1 cm、8時間後ではほぼコアの最上部まで到達している。砂岩（和歌山県白浜産）および凝灰岩（福島県耶麻産）についても同様の実験を行うと、花崗岩とは異なった現象が認められた。すなわち、砂岩においては樹脂の浸透状態は不規則で、試料の周辺から浸透している状況が観察され（図2-4E, F）、凝灰岩では、24時間経過した試料においても内部への樹脂の浸透はほとんどみられなかった（図2-4G, H）。

## 2. 3 カリ長石の染色による可視化

これまで述べてきた方法は、蛍光剤や染料を添加した樹脂を用いて微細な割れ目や間隙を観察しようとするものであったが、特定鉱物のみを選択的に染色することができれば、同様の考え方によってその鉱物粒子の形状や大きさの変化を把握することが可能となる。カリ長石では染色反応が知られており、カリ



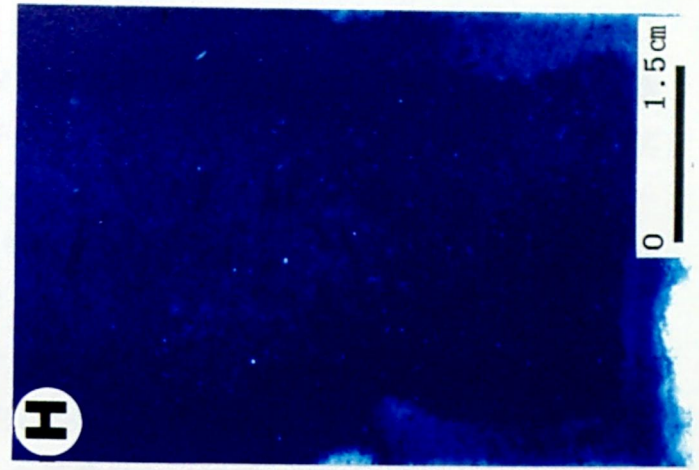
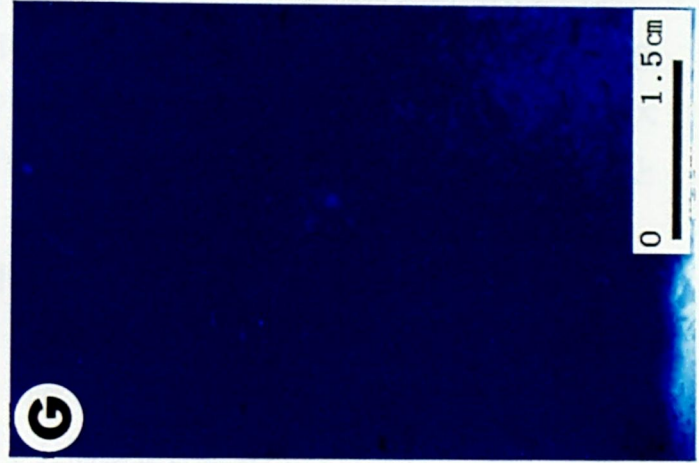
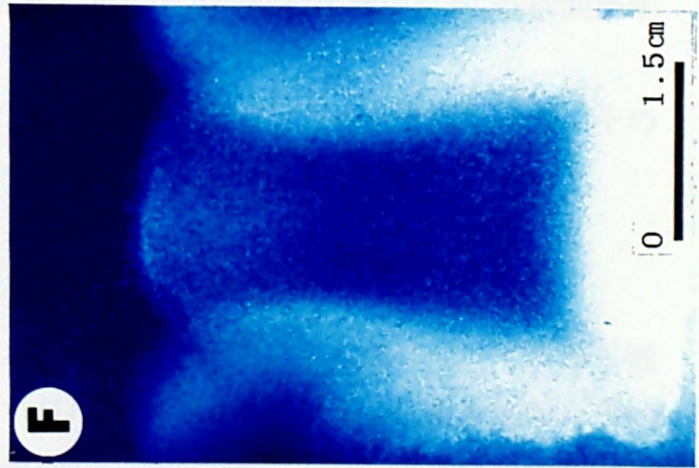
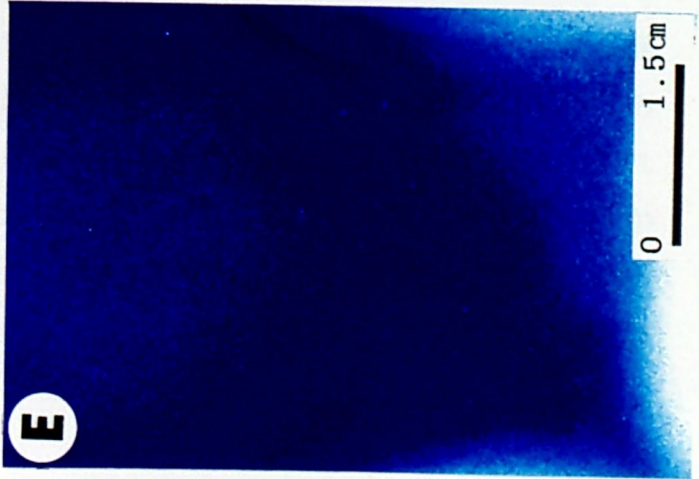
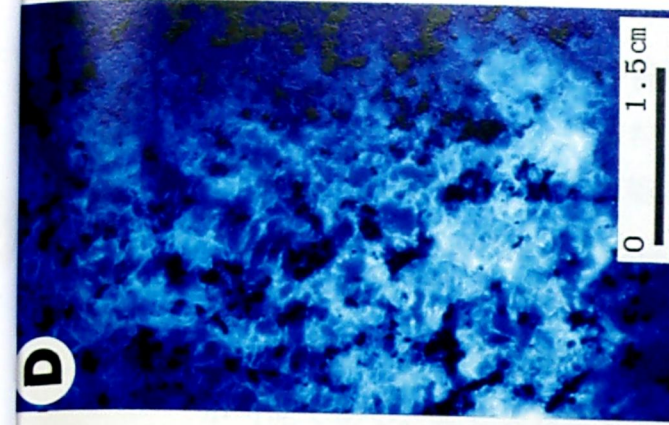
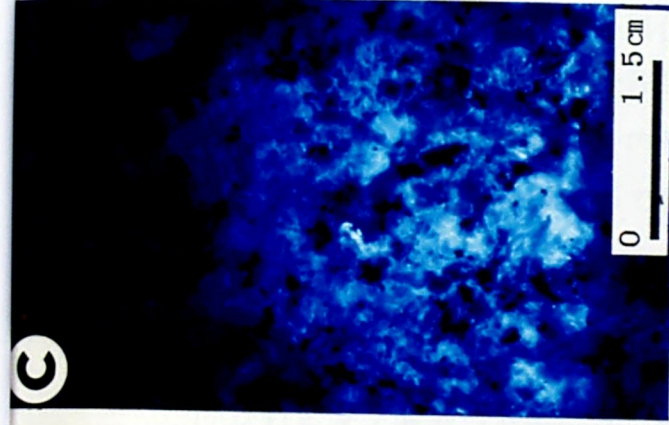
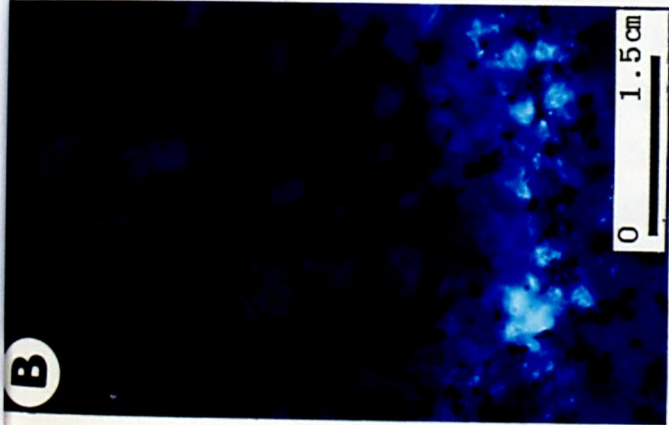
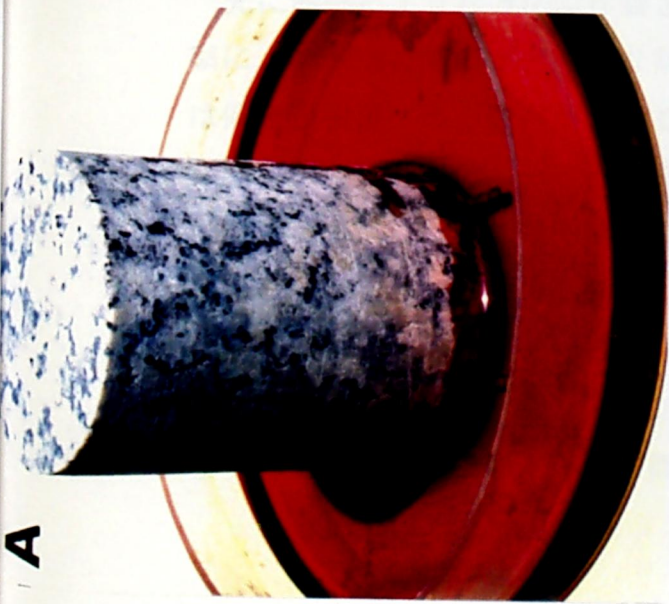


図2-4 花崗岩，砂岩，凝灰岩における樹脂の浸透状況

A: 樹脂の浸透実験状況，B: 花崗岩（0.5時間後），C: 花崗岩（2時間後），D: 花崗岩（8時間後），

E: 砂岩（1時間後），F: 砂岩（12時間後），G: 凝灰岩（1時間後），H: 凝灰岩（24時間後）



長石の判定や簡便なモード分析などに用いられている。カリ長石は代表的な造岩鉱物であるので、カリ長石粒子の変化を知ることによって、多くの岩石の劣化の機構を考察することが可能となる。

従来のカリ長石の染色方法は<sup>10)</sup>、沸化水素酸によりカリ長石から溶脱したカリウムがコバルチ亜硝酸ナトリウムと化学反応を起こして黄色に着色するものであるが、腐食の時間を調節することにより、カリ長石のみを染色することが可能である。たとえば、花崗岩においては、黄色に染色されたカリ長石は、透明な石英、白色の斜長石、黒色の黒雲母とは鮮明に識別される（図 2-5）。また、カリ長石の化学的風化作用により生成するカオリンはこの方法では染色されないので、カリ長石粒子内や周辺の化学的風化作用によりできた形状や大きさの変化を認識することができる。花崗岩中のカリ長石の染色手順を示すと次の通りである。

- ①風化が激しく脆弱な試料は透明なシアノアクリレートによってあらかじめ固定させる。
- ②試料をダイヤモンドカッターで切断し、研磨した後自然乾燥させる。
- ③沸化水素酸の蒸気で研磨面を約 3 分間腐食させる。
- ④腐食させた表面をコバルチ亜硝酸ナトリウムの飽和溶液中に約 30 秒間浸すとカリ長石は黄色に染色される。
- ⑤蒸留水で余分なコバルチ亜硝酸ナトリウムを洗浄した後自然乾燥する。その後、脱色防止のため表面にラッカーを塗布する。

## 2. 4 可視化された割れ目や間隙の顕微鏡による観察

先に述べたような方法で作製された試料は、大きい割れ目については肉眼観察により判別できるが、微細な割れ目になると実体顕微鏡、反射顕微鏡あるいは偏光顕微鏡による観察が必要である。

染色法の場合には、一般には赤色が最も判別しやすく、試料の薄片による偏光顕微鏡観察では割れ目や間隙の識別だけでなく、構成鉱物の鑑定も可能である。したがって、アルカリ骨材反応によって形成された割れ目のように、割れ目と構成鉱物との関係を知る必要がある場合などはきわめて有効である。しかしながら、高倍率にすると染色による効果が少なくなり、判別が次第に困難になり、また、黒雲母のように顕微鏡下で茶色を呈する鉱物については赤色との

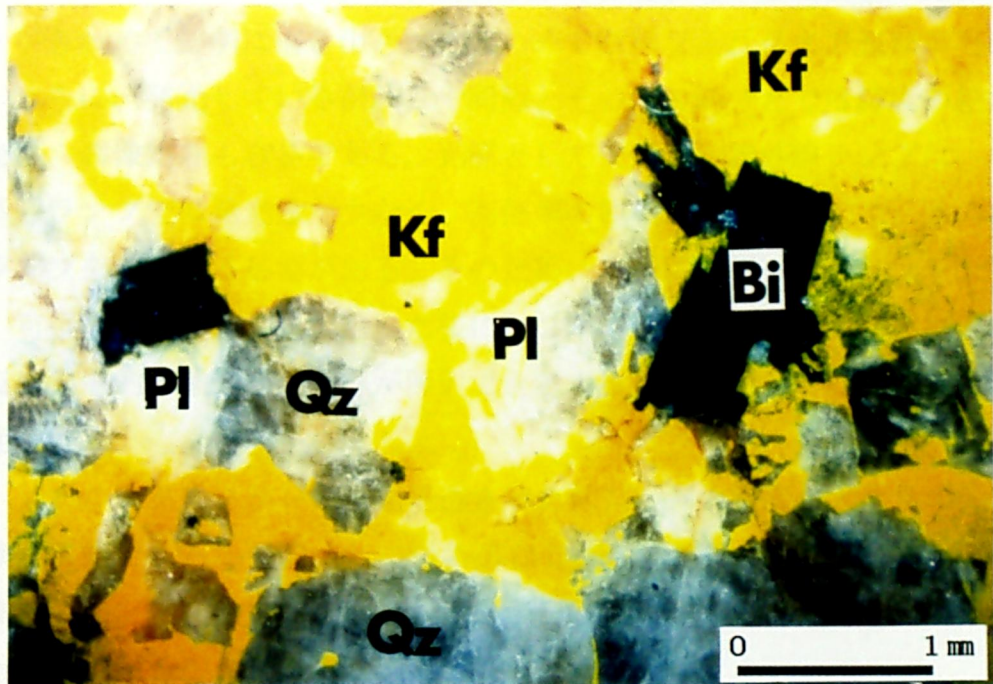


図2-5 カリ長石を黄色に染色した試料（花崗岩）  
Kf:カリ長石, Pl:斜長石, Qz:石英, Bi:黒雲母

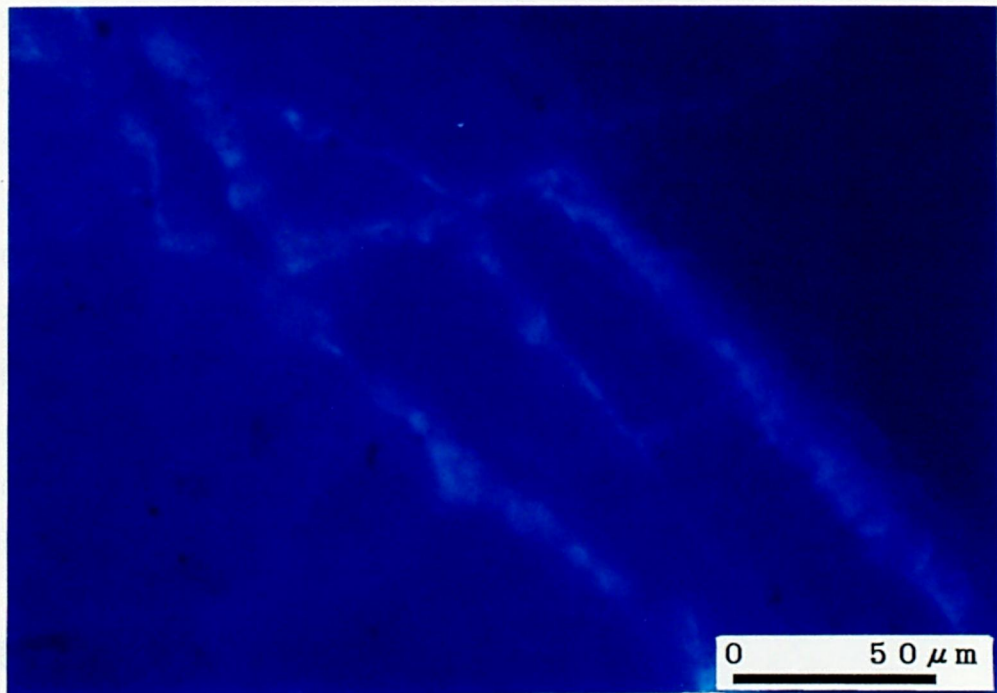


図2-6 高倍率の顕微鏡観察（花崗岩，紫外線）

濃淡の差が少なく、画像処理が困難になるという欠点がある。

蛍光剤を添加した樹脂の場合には、強力な紫外線を照射すると樹脂の充填された部分がきわめて鮮明に描き出され、きわめて微細な割れ目まで観察が可能となる。さらに、発光している割れ目や間隙とその他の部分とでは輝度の差が大きくなり、画像処理も容易である。光源として使用する紫外線ランプは、普通の紫外線ランプでは発光量が少なく、高倍率の観察はできないので、強力な紫外線ランプを使用する必要がある。そのため、光源に水銀ーキセノンランプを用い、可視光をフィルターで除いた後に、2本の石英ライト・ガイドにより観察地点に集中的に強力な紫外線が照射できるようにした新しい紫外線照射装置を使用した。

次に、メチルメタアクリレートを浸透させた試料がどの程度の大きさの間隙まで観察が可能であるかを調べた。図2-6は花崗岩試料に十分に樹脂を浸透させ、高倍率の反射顕微鏡で観察したもので、幅数 $\mu\text{m}$ 程度までの微細な割れ目についても十分観察が可能であることがわかる。

## 2. 5 岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の観察例

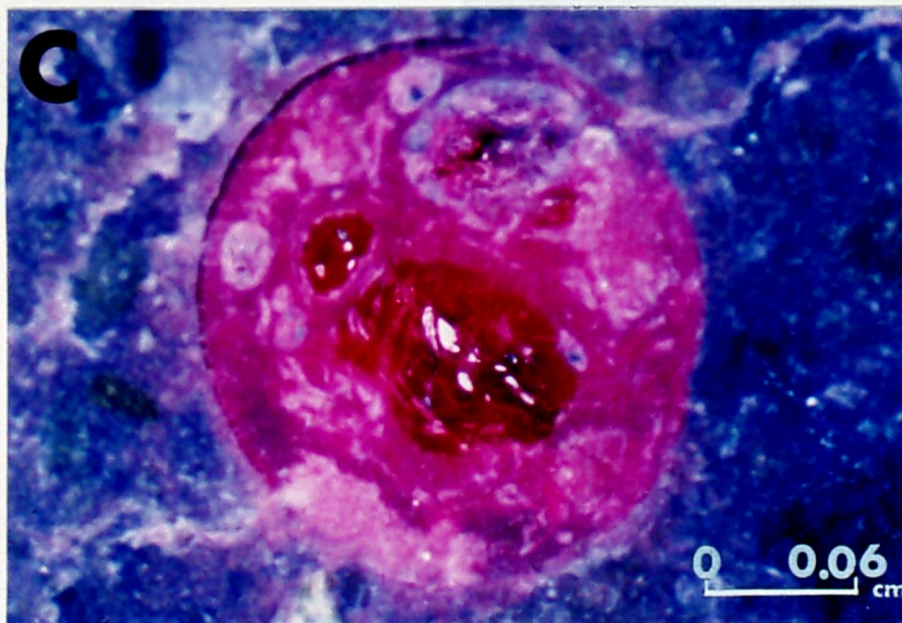
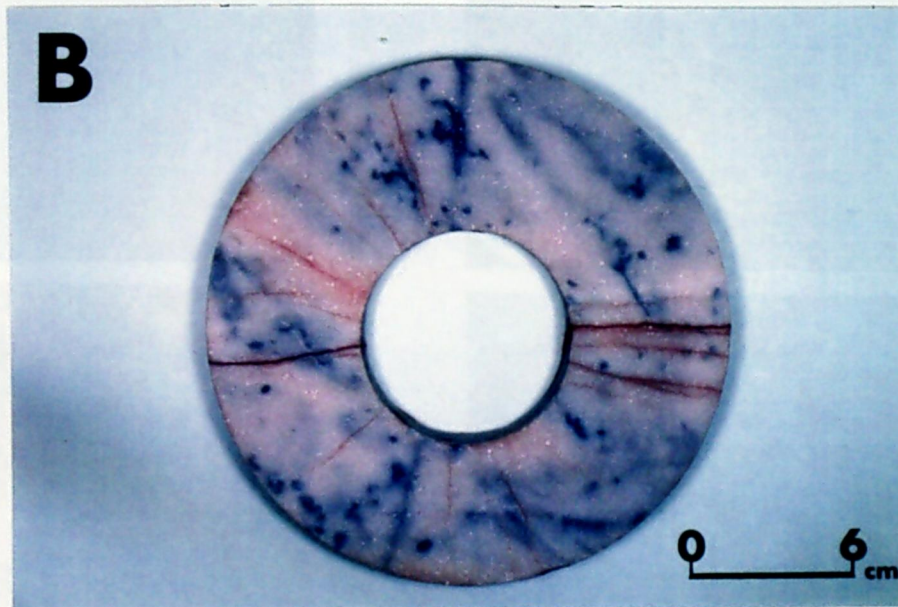
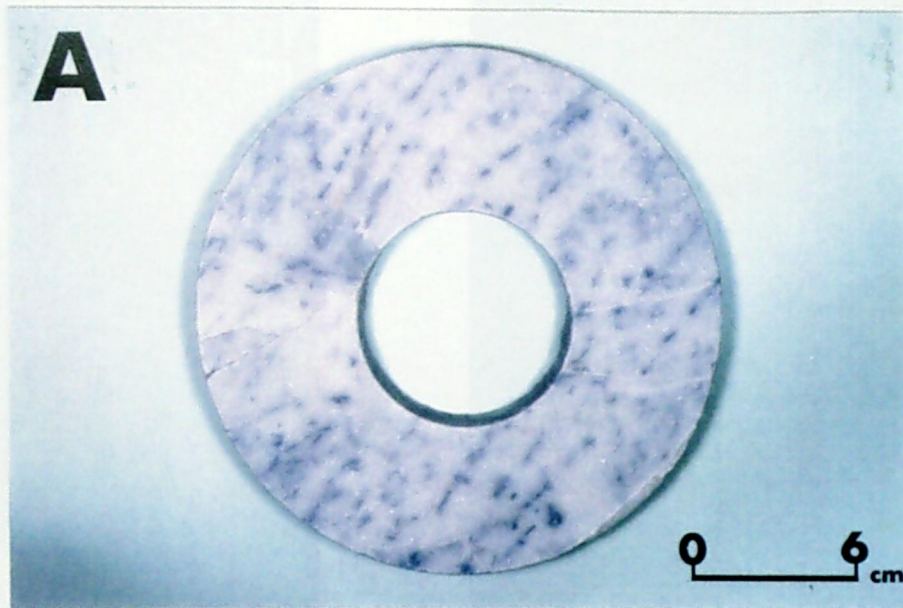
### (1) 比較的大きな割れ目や間隙

比較的大きな割れ目や間隙については、赤色の染料を添加した樹脂を充填させた試料を可視光で観察することにより、その分布状況を把握することができる。図2-7A, Bは破壊試験の行われた大理石と、破壊試験の行われた後に赤色の染料を添加したメチルメタアクリレートにより割れ目を充填した大理石を比較したものである。図2-7Aに比べると図2-7Bでは破壊試験によってできた割れ目の状況がはっきりと観察できる。また図2-7Cは図2-7Bと同様に赤色の染料を添加したメチルメタアクリレートをコンクリートに充填し、低倍率の実体顕微鏡で観察したもので、コンクリート中に存在していた気泡には周辺から浸透してきた樹脂が溜まっているのがわかる。なお、樹脂は固化する際に収縮するので、気泡中の樹脂にみられる空隙は固化の時の収縮によりできたものと思われる。

### (2) 泥質片岩中の微細な割れ目

泥質片岩に赤色の染料と蛍光剤を同時に混合したメチルメタアクリレートを





2-7 破壊試験の行われた大理石中の割れ目およびコンクリート中の気泡に充填した樹脂の可視光による観察

A: 破壊試験の行われた大理石

B: 赤色の染料を添加したメチルメタアクリレートを割れ目に充填した大理石

C: 赤色の染料を添加したメチルメタアクリレートを充填したコンクリート



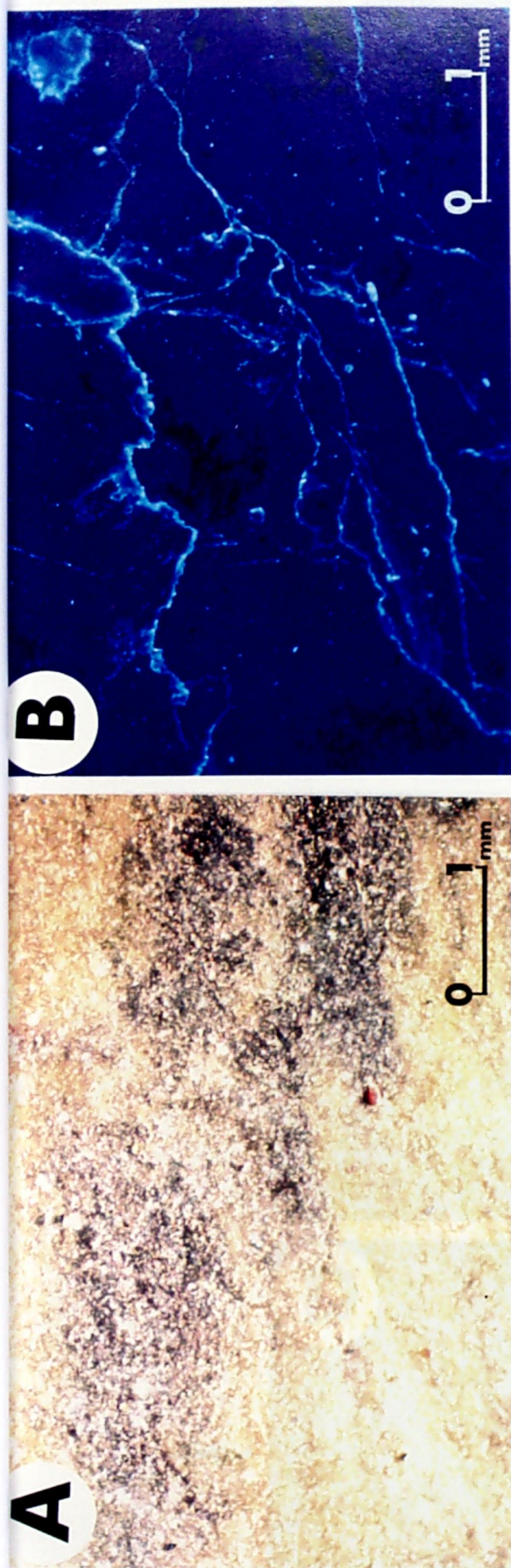


図2-8 蛍光剤を添加したメチルメタクリレートに浸透させた泥質片岩 (A:可視光, B:紫外線)

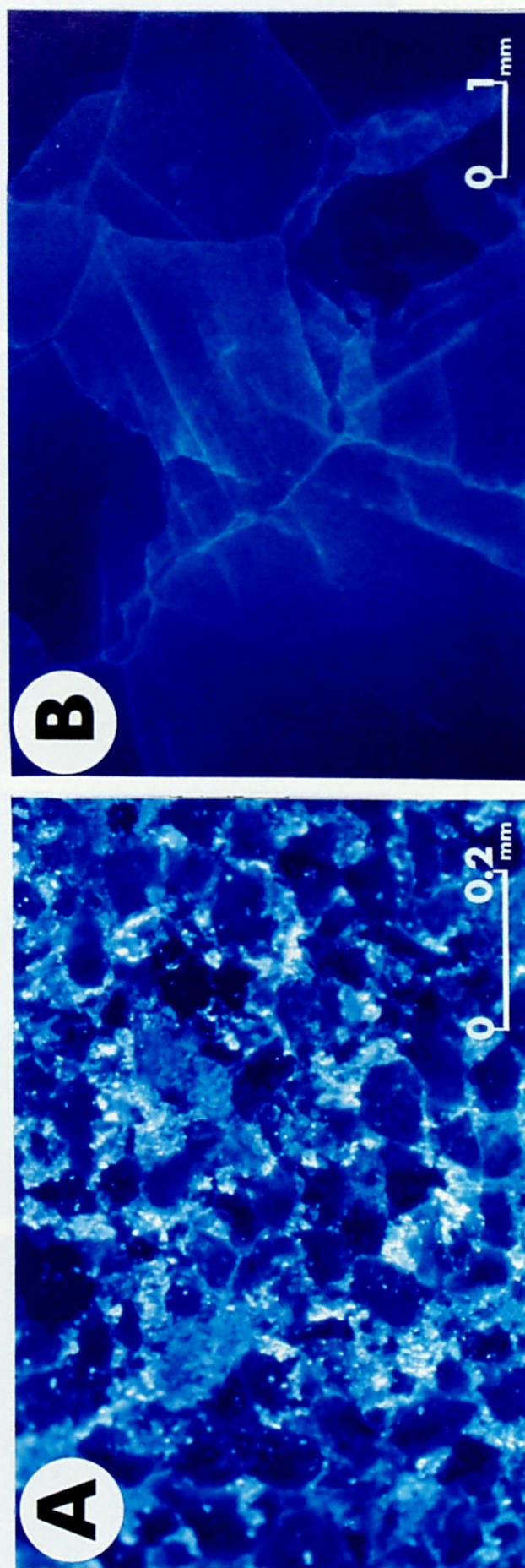
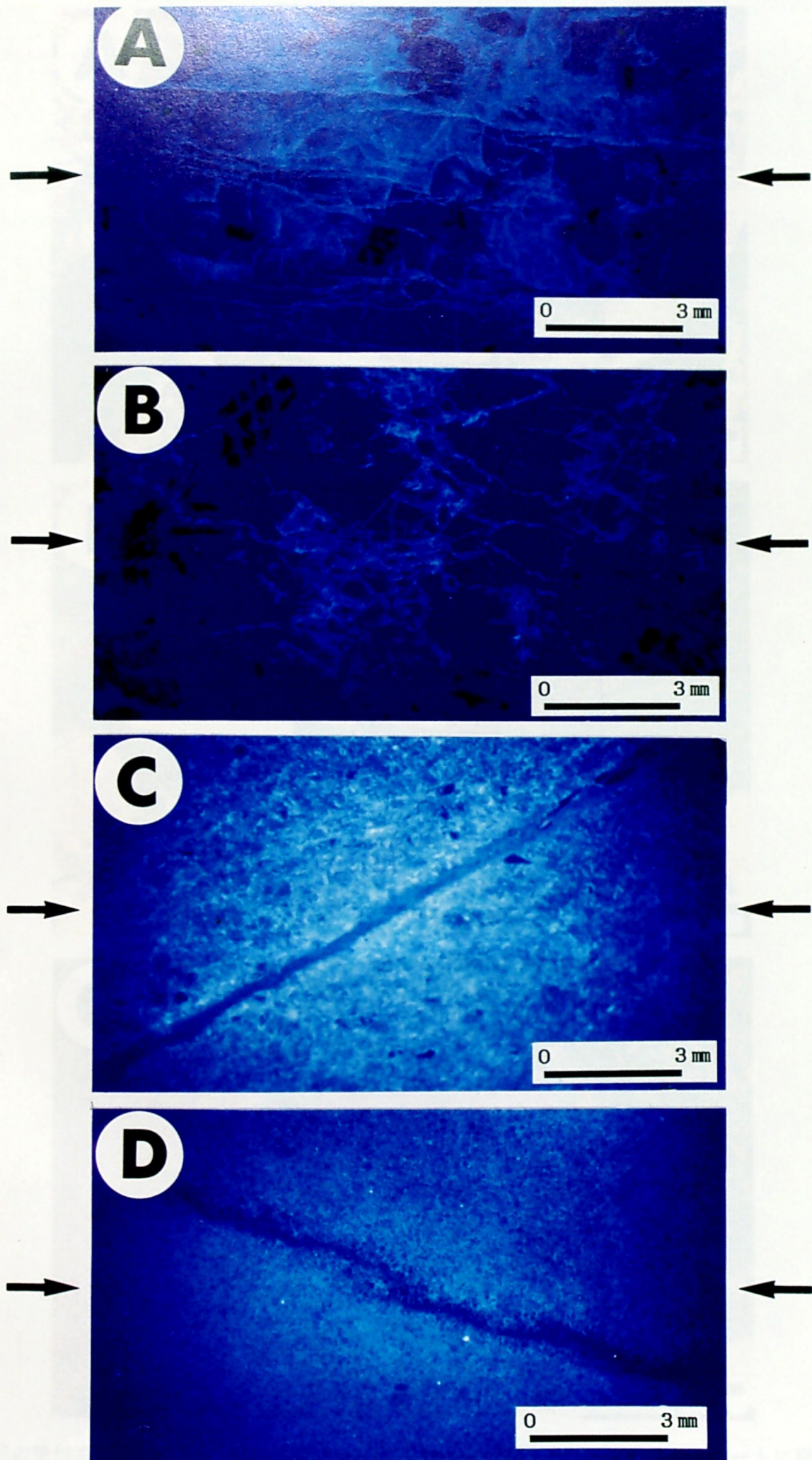


図2-9 蛍光剤を添加したメチルメタクリレートに浸透させた砂岩と石灰岩  
(A:砂岩, 紫外線, B:石灰岩, 可視光)





2-10 一軸圧縮により形成された割れ目を観察するために蛍光剤を添加したメチルメタアクリレートを浸透させた試験片 (A:花崗岩, B:安山岩, C:凝灰岩, D:大理石)



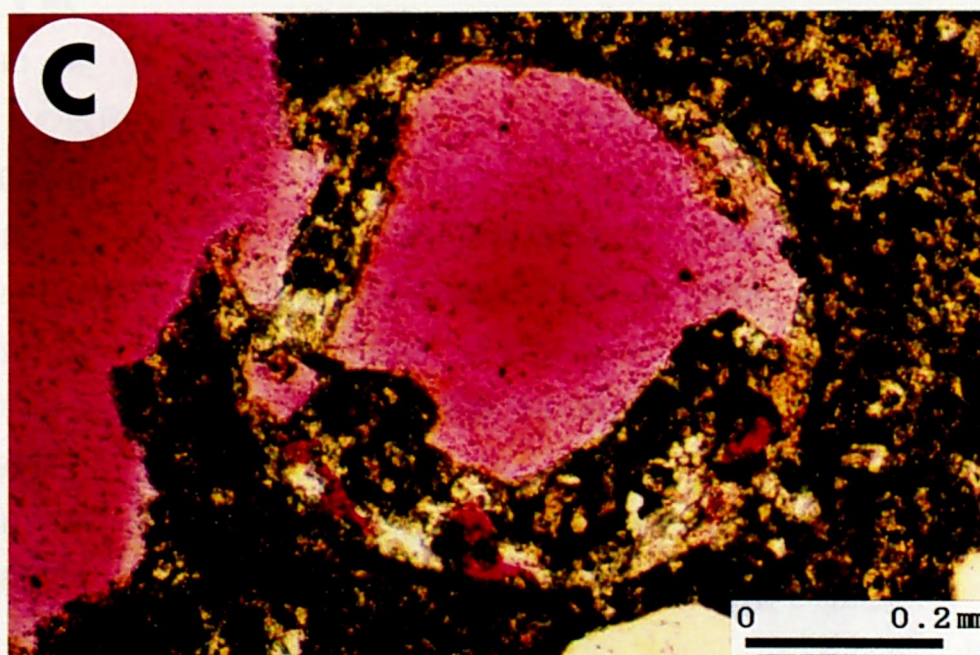
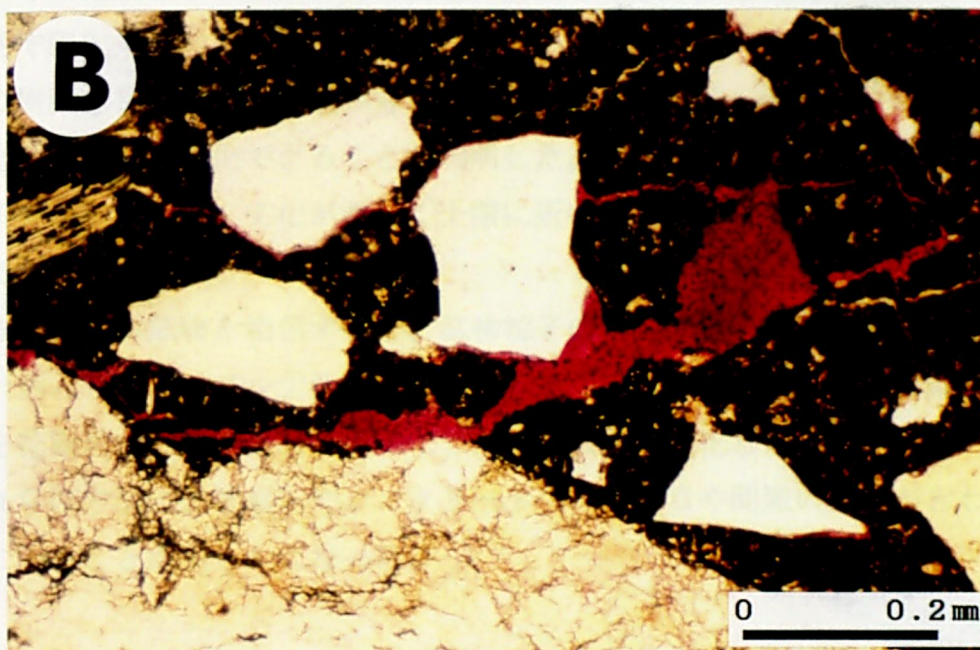
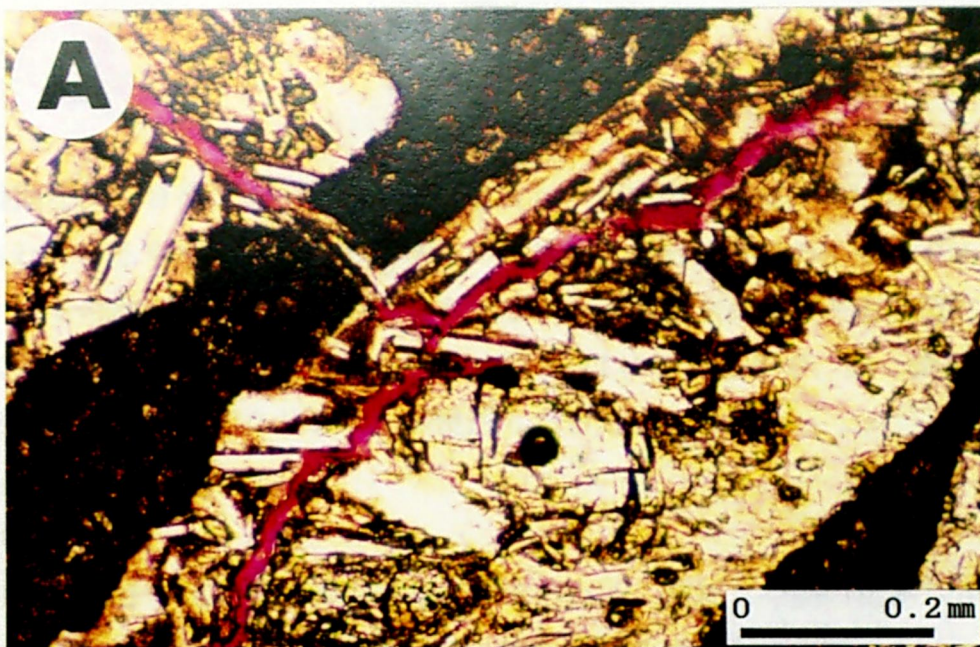


図2-11 赤色の染料を添加したシアノアクリレートをアルカリ骨材反応を起こしたコンクリートに浸透させた試料  
 A: 安山岩中に形成された割れ目と割れ目を充填した反応生成物(単ニコル)  
 B: モルタルと骨材の境界部の間隙に形成された不規則なアルカリ骨材反応生成物(単ニコル)  
 C: モルタル中の球形の間隙とその内部を充たす反応生成物(単ニコル)

た不規則な割れ目や反応生成物が確認された。反応生成物は、反応性骨材中に形成されているもの、骨材とモルタルの境界部にみられるもの、モルタル中に存在するものなど広く分布し、形状も球形をなすものとクラックを充填しているものなどに分けられる。代表的なものは図 2-11 に示す通りで、赤く染色されている部分がシアノアクリレートが浸透したところである。

## 2. 6 結言

微細な割れ目や間隙の観察を容易にするために、割れ目や間隙にあらかじめ蛍光剤や染色剤を添加した樹脂を浸透、固化させる方法を検討した。その結果、浸透性や固化条件の異なるシアノアクリレートとメチルメタアクリレートの 2 種類の樹脂を目的に応じて使い分けることによって、種々の割れ目や間隙に樹脂を充填させ、可視化できることが判明した。この方法は、割れ目や間隙の少ない新鮮な試料から、劣化が激しく土壌に近いような脆弱な試料まで、適用が可能である。

一方、特定の鉱物を染色すると、鉱物粒子の変化の様子が観察可能となる。その一例として、コバルチ亜硝酸カリウムを用いてカリ長石を黄色に染色する方法を花崗岩中のカリ長石に適用し、カリ長石を可視化した。

これらの方法により岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の観察がきわめて容易になることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 西山 孝・前川慎喜・楠田 啓・北川元紀, 中野欽一: 染色したコンクリートの画像処理による観察, セメント・コンクリート論文集, No.43, 590-593, (1989)
- 2) 西山 孝・衣笠真司・楠田 啓: 画像処理による花崗岩中の間隙の観察, 平成元年度日本応用地質学会講演論文集, 25-28, (1989)
- 3) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀: 蛍光法による岩盤割れ目の観察, 資源・素材学会 1990 年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集, 307-308, (1990)
- 4) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀: 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出, 資源と素材, 106 巻, 10 号, 573-579, (1990)



- 5) 西山 孝・楠田 啓：蛍光法による微小割れ目の視覚化と画像処理，地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集，12-17, (1990)
- 6) 西山 孝・楠田 啓：蛍光法による間隙の可視化，資源・素材'92 分科研究会資料，Q，1-4, (1992)
- 7) Nishiyama, T. and Kusuda, H. : Identifications of Pore Spaces and Microcracks Using Fluorescent Resins, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol. 31, No.4, 369-375, (1994)
- 8) 楠田 啓・西山 孝・日下部吉彦・沖村 孝：花崗閃緑岩中のカリ長石の風化について，土質工学会風化残積土に関するシンポジウム発表論文集，85-88, (1988)
- 9) Nishiyama, T., Kusuda, T. and Nakano, K.: A Few Remarks on Alkali-Reactive Chert Aggregates, Proceedings of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 543-549, (1989)
- 10) Bailey and Stevens, R.E.: Selective staining of K-feldspar and plagioclase on rock slabs and thin sections, Am. Mineral., 1020-1025, (1960)

## 第3章 割れ目や間隙の画像処理

### 3. 1 緒言

蛍光剤や染料を添加した樹脂の充填や化学反応によって着色あるいは発光した割れ目や間隙は、その他の部分と明るさの差が顕著になり、画像処理に適している。画像処理の手法はこれまでにさまざまな方法が開発されているが、個々の目的に応じて適切な方法を試行錯誤により組み合わせて使用されているのが現状である。そこで、すでに開発されている手法を用いて、割れ目や間隙の存在程度を定量的に測定するための手法を考察した<sup>1)~5)</sup>。

### 3. 2 画像処理システム

画像処理のシステムは図3-1に示すとおりで、大きく分けて顕微鏡、CCDカメラ、画像処理装置、XYステージおよびパーソナルコンピュータから構成されている。

CCDカメラは低倍率の時は顕微鏡の上部に取り付けが可能な小型のもので観察可能であるが、高倍率で観察する場合には光量が不足するために、さらに高感度のCCDカメラが必要となる。高感度CCDカメラのサイズは通常使用しているカメラよりも大きいので、堅固なステージを用い、顕微鏡の上部に固定しなければならない。

画像処理装置は(株)PIAS社製のLA-500Kを、ホストコンピュータとしては、NEC社製のPC-9801Eを使用した。またXYステージは中央精機(株)製で、GPIBにより制御され、広い範囲の連続処理を可能にしている。このようなシステムによって、反射顕微鏡あるいは偏光顕微鏡レベルの微小な部分から、実体顕微鏡あるいはさらに大きい物体（数cm～数mオーダー）まで処理できる。

### 3. 3 画像処理による割れ目や間隙の解析

画像処理により岩石やコンクリート中の割れ目や間隙を測定するには、次のような5つのステップが必要である。すなわち、画像を入力する際のノイズを低減させる手法、入力した画像を鮮明にする手法、目的とする岩石やコンクリート中の割れ目や間隙を抽出する手法、抽出した画像を現実に近い形に補正す

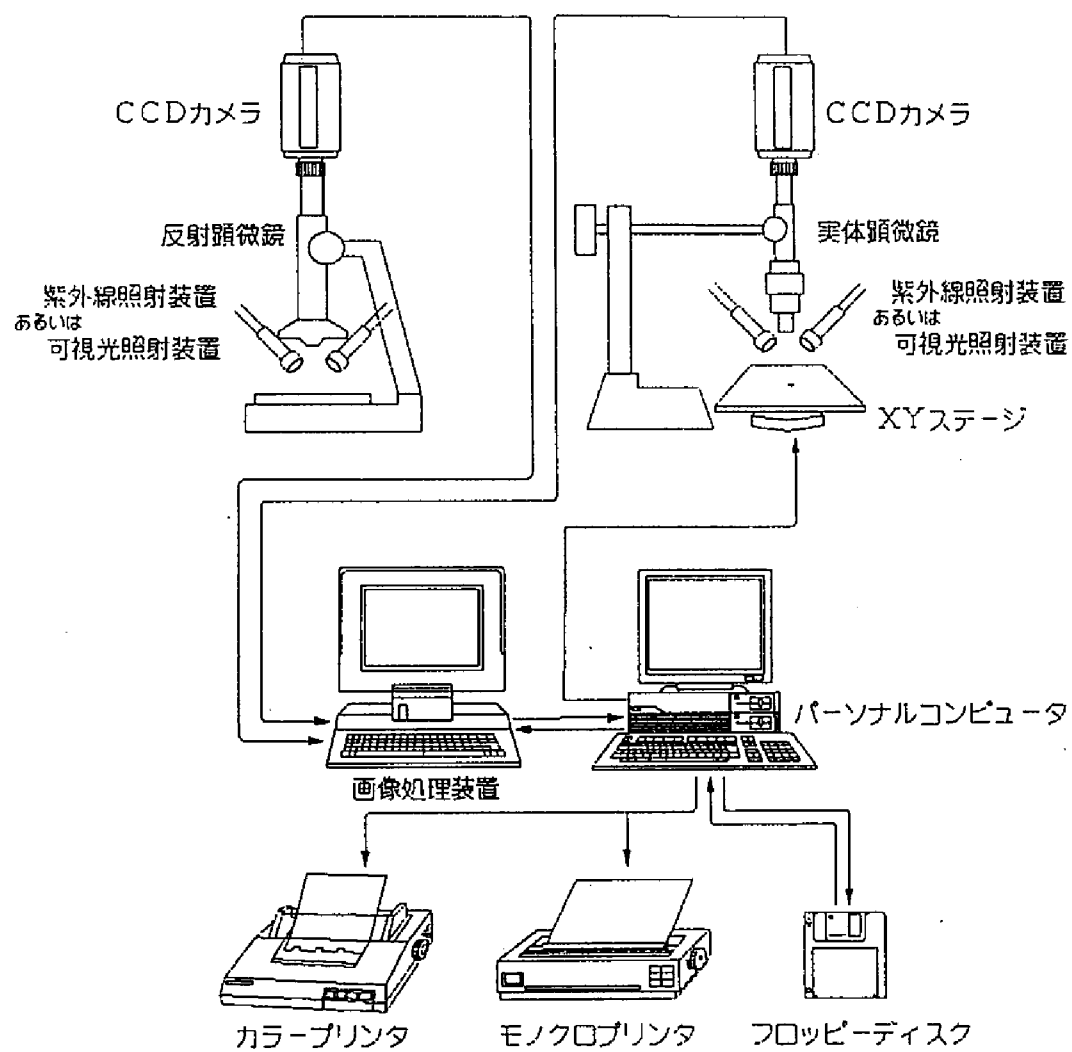


図3-1 本研究で用いたシステムの概略図

る手法、処理された画像から必要な情報を解析する手法、の5つである。それぞれのステップにおける画像処理の手法について以下に述べる。

### (1) 画像入力

画像処理においては、写真や図面などのアナログ情報は標本化と量子化を経てデジタル画像に変換される。画素とはデジタル画像の計算機処理上の単位のこと、各画素における濃淡レベルは輝度という値で表現される。本研究で使った画像処理装置では、縦480×横512の計245,760画素で1枚の画像を構成している。輝度情報は黒～白の間の濃淡レベルを0（黒）～255（白）の256階調に区分し、濃淡を表現するようになっている。

画像を入力する際にもっとも必要なことは、ノイズの少ない画像を原画像として用いることである。具体的なノイズの低減方法については、積分入力などの方法が知られている<sup>6)</sup>。しかし、本研究で得られる画像は樹脂の発光などの前処理によってすでに鮮明な像になっており、また静止画像であるためにノイズは少なく、CCDカメラを通して得られる画像をそのまま入力しても大きな障害はない。

### (2) 画像の鮮鋭化

入力した画像を鮮明にする手法としては、コントラストの悪い画像については、ヒストグラムの平坦化処理<sup>6)</sup>やダイナミックレンジの拡大処理<sup>7)</sup>が有効である。一例を示すと図3-2の通りで、原画像とこれらの処理を行った画像を対比したものである。この他に、画像全体を鮮明にするための手法としてはラプラシアンオペレータによる画像強調処理<sup>8)</sup>がある（図3-3）。しかしながら、このオペレータはわずかな輝度の差にも敏感であるためにランダムノイズが生じ易いので、メディアンオペレータによるエッジ保存平滑化処理の併用によりノイズを低減させることが望ましい。

### (3) 割れ目や間隙の抽出

割れ目や間隙を抽出する手法としては、大きく分けて輝度の差を利用する方法と、色調の差を利用する方法の2つに分けられる。前者はさらに対象物が線状であるか面状であるかによって異なり、線状物体の場合には2次微分オペレ

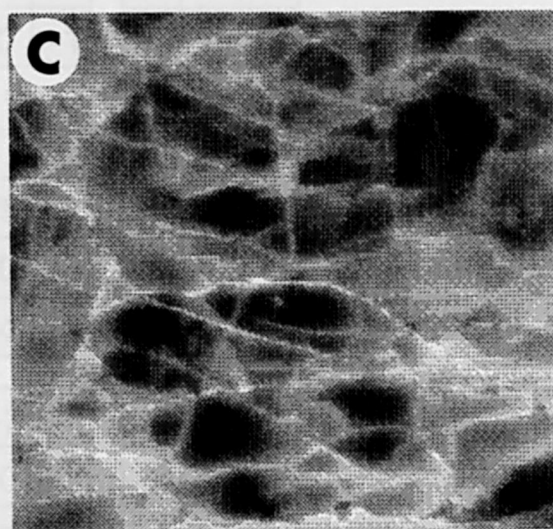
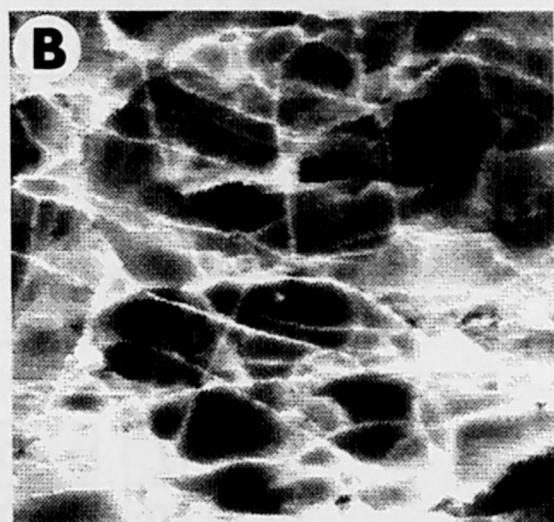
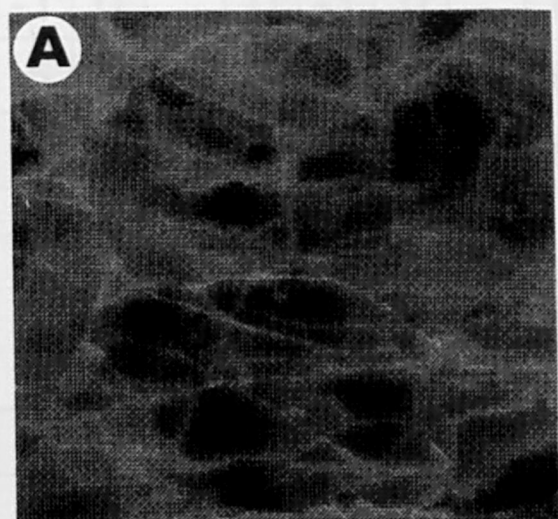


図3-2 画像処理により画像を鮮鋭化した例  
 A:原画像，輝度値のヒストグラムを平坦化処理した画像，  
 C:輝度値のダイナミックレンジを拡大した画像

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

 $=$ 

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

 $+$ 

0	0	0
0	1	0
0	0	0

強調用ラプラシアン      ラプラシアン      原画像

図3-3 画像強調用ラプラシアンオペレータの構成

-5	0	0	-5	0	0	-5
0	0	0	0	0	0	0
0	0	5	5	5	0	0
-5	0	5	5	5	0	-5
0	0	5	5	5	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	-5	0	0	-5

(a) 二次微分オペレータの一例

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

 $\Delta x f$ 

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

 $\Delta y f$ 

(b) Sobel オペレータ

5	5	5
-3	0	-3
-3	-3	-3

5	5	-3
5	0	-3
-3	-3	-3

5	-3	-3
5	0	-3
5	-3	-3

-3	-3	-3
5	0	-3
5	5	-3

-3	-3	-3
-3	0	-3
5	5	5

-3	-3	-3
-3	0	5
-3	5	5

-3	-3	5
-3	0	5
-3	-3	5

-3	5	5
-3	0	5
-3	-3	-3

(c) Kirsch オペレータ

図3-4 割れ目の強調に用いたオペレータ

(a) 二次微分オペレータの一例, (b) Sobel オペレータ, (c) Kirsch オペレータ

ータ、Sobel オペレータ<sup>9)</sup>、Kirsch オペレータ<sup>2) 5)</sup> (図 3-4) あるいはこれらの併用が有効である。一方、面状物体の場合にはラプラシアンオペレータとメディアンオペレータを併用した方法が有効である。

色調の違いを利用する方法としては、赤、緑、青の 3 色の光学フィルターを用い、これらのフィルターを通して得られる画像を組み合わせることで目的部分の抽出を行う方法がある<sup>10)</sup>。たとえば、赤色のフィルターを通して得られる画像から青色のフィルターを通して得られる画像を減算することによって黄色の物体のみを抽出した画像が得られる。

#### (4) 画像の補正

抽出した画像を補正する手法として、もっとも簡単なものは、一定画素数以下の物体を消去するノイズ除去の手法であり、これは処理の最終段階において使用するのが効果的である。これ以外に、線状の物体の長さだけを問題にする際には細線化処理が優れている。これは 2 値画像において物体の幅をすべて機械的に 1 画素とするもので、本研究においては Hilditch の方法を採用した。さらにこのような処理の過程で物体が現実の形から離れて細分化されてしまうようなことがあるが、この場合は画像の連結処理を行うことにより補正できる。これは画像の膨張処理と選択的な縮退処理を組み合わせで行うものであり、対象物が割れ目のような線状の物体には有効である。

#### (5) 画像の解析

以上述べたような方法で処理された画像から必要な情報を取り出し解析する手法は、画像処理装置に内装されている画像解析計算機能を必要に応じて組み合わせる。たとえば、割れ目を定量的に測定するには、2 値画像における割れ目の部分の面積比から割れ目の量を求める方法や、2 値画像にさらに細線化処理を施した後に割れ目の長さを計測する方法がある<sup>9)</sup>。このうち、割れ目の長さを求める方法としては、割れ目と判断される物体の周囲長を求めその 1/2 を割れ目長さとして近似する方法と、割れ目を枝毎に分割した後に、分割された物体の最大径を求め、これを割れ目長さとして近似する方法の 2 つが考えられる<sup>11)</sup>。また、微細な間隙の存在量の違いにより生じる輝度の濃淡を定量的に表現するためには、解析領域における輝度値を積算し、画素数で除すること

によって得られる平均輝度値を利用することができる。

### 3. 4 画像処理例

先に述べた画像処理の手法を組み合わせることにより、目的に応じたさまざまな解析を行うことができる。これまでに行った解析のうち、代表的な2例をあげて画像処理の手順、測定結果について述べる。

#### 3. 4. 1 微細な割れ目の抽出と解析

試料中に存在する微小な割れ目を抽出する手順としては、まず、入力した画像（図3-5A）のコントラストを強調するために、ラプラシアンオペレータとメディアンオペレータを組み合わせ用いた。割れ目の部分を強調する方法としては、Kirsch オペレータを適用した（図3-5B, C）。その後、二次微分フィルターを用いると割れ目のような線状の部分だけがさらに強調される（図3-5D）。この画像をしきい値処理すると割れ目の部分を抽出できる（図3-5E）。画像全体が暗く、輝度の分布範囲が狭い時にはしきい値の決定が困難になるので線形のダイナミックレンジ拡大処理を行い、画像情報を変えることなくコントラストを強調し、最適なしきい値を決定した。得られる2値画像はほぼ割れ目の部分を抽出しているが、処理の過程で割れ目が細分化されて現実の形と異なっているところが部分的に現れることがある。この場合は、画像の連結処理を用い、ノイズ除去と併せて画像の補正を行った。最終的に抽出された割れ目の画像では割れ目の方向や分布状況については信頼性はあるが、割れ目の幅については必ずしも元の情報を残しているとはいえない。したがって、幅は無視し長さの情報だけを得るために、さらに細線化処理を行うと割れ目の分布状況が明らかになる（図3-5F）。また、図3-6は3 cm × 3 cmの範囲をXYステージを用いて5 mm × 5 mm ずつの領域に分けて処理し、結果を合成したものである。

#### 3. 4. 2 微細な間隙の存在状況の表現と解析

試料によっては割れ目だけでなく微細な間隙が存在している。そこでこのような微細な間隙の存在状況をカラーコンターマップにより表現するとともに、間隙の存在程度を定量的に測定する方法について検討した。まず入力した画像



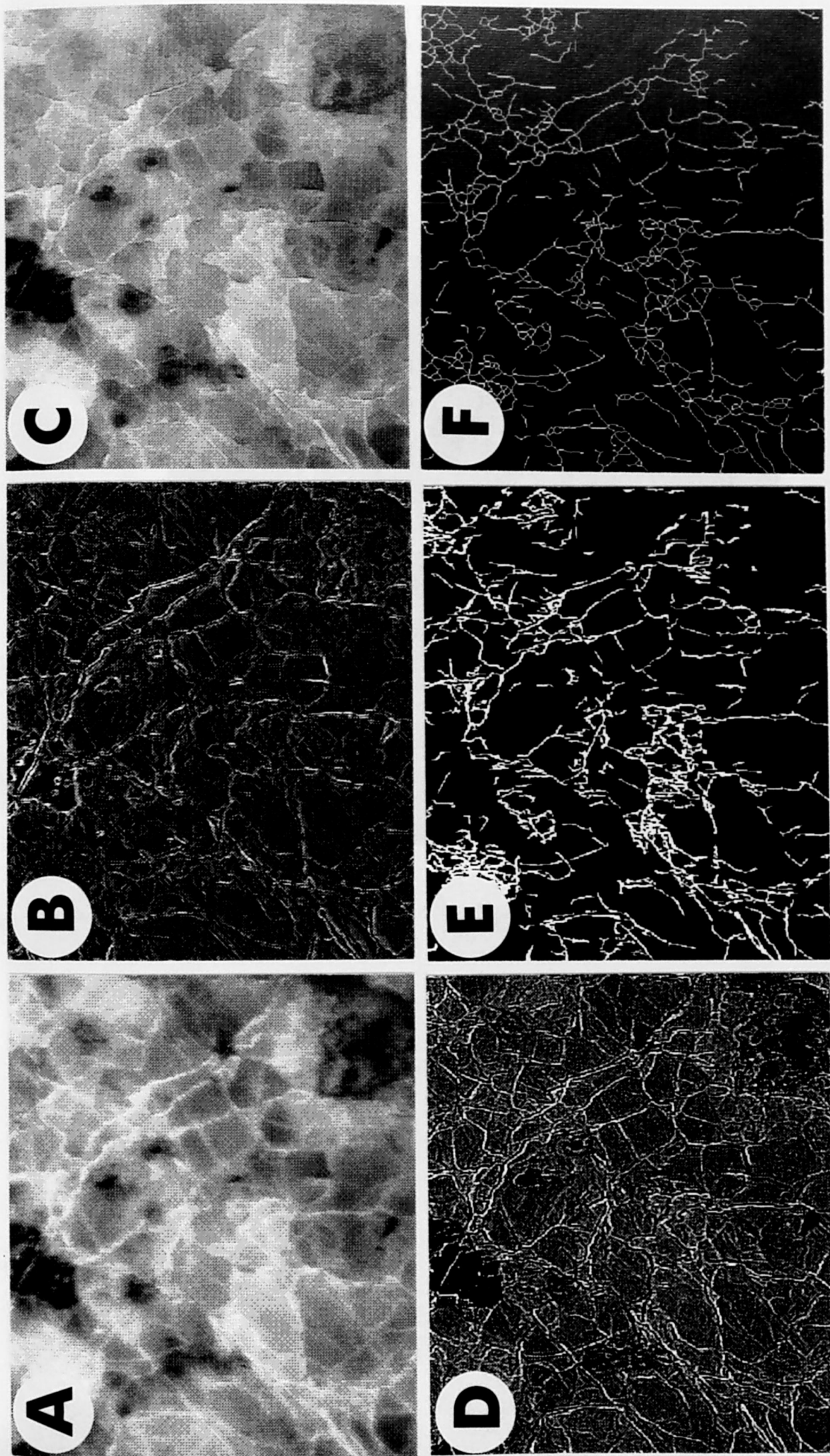


図3-5 岩石中の割れ目の画像処理例

A:入力した濃淡画像, B:Kirschオペレータにより検出された画像のエッジ, C:Kirschオペレータによりエッジを強調した画像, D:二次微分オペレータにより割れ目を強調した画像, E:割れ目を抽出した2値画像, F:細線化処理した画像

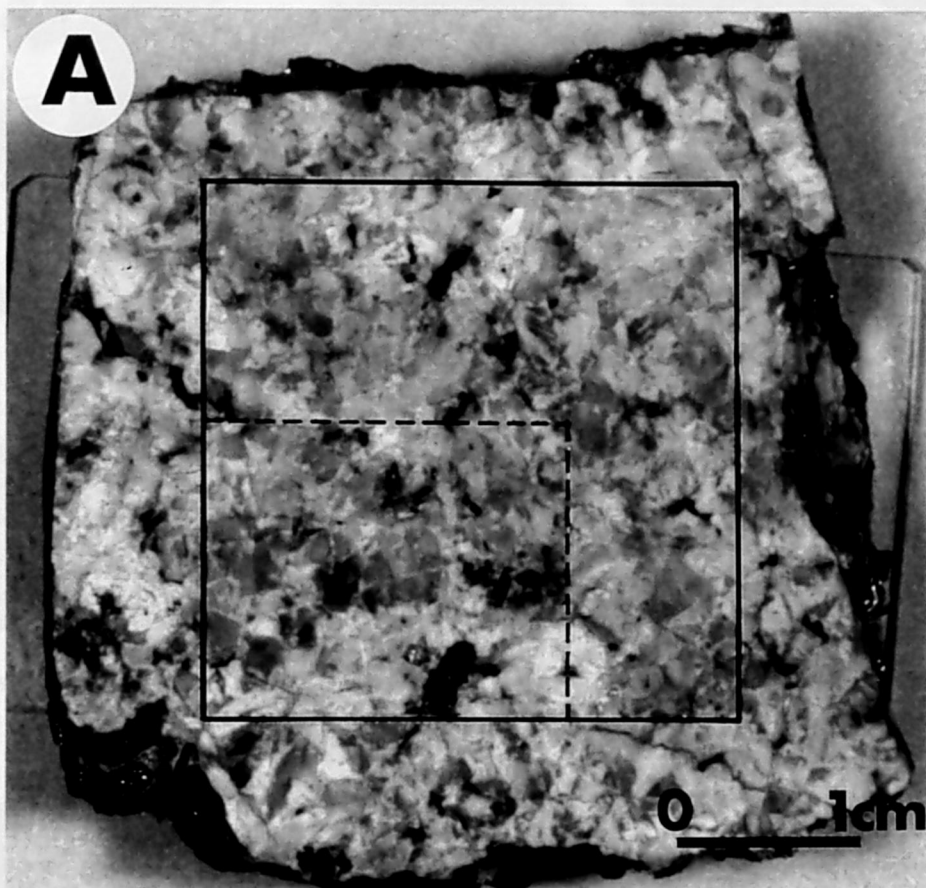


図2-6 岩体中の岩石の分布状況を示す

（左側は岩石の分布状況を示す。右側は岩石の分布状況を示す。）

（左側は岩石の分布状況を示す。右側は岩石の分布状況を示す。）

（左側は岩石の分布状況を示す。右側は岩石の分布状況を示す。）

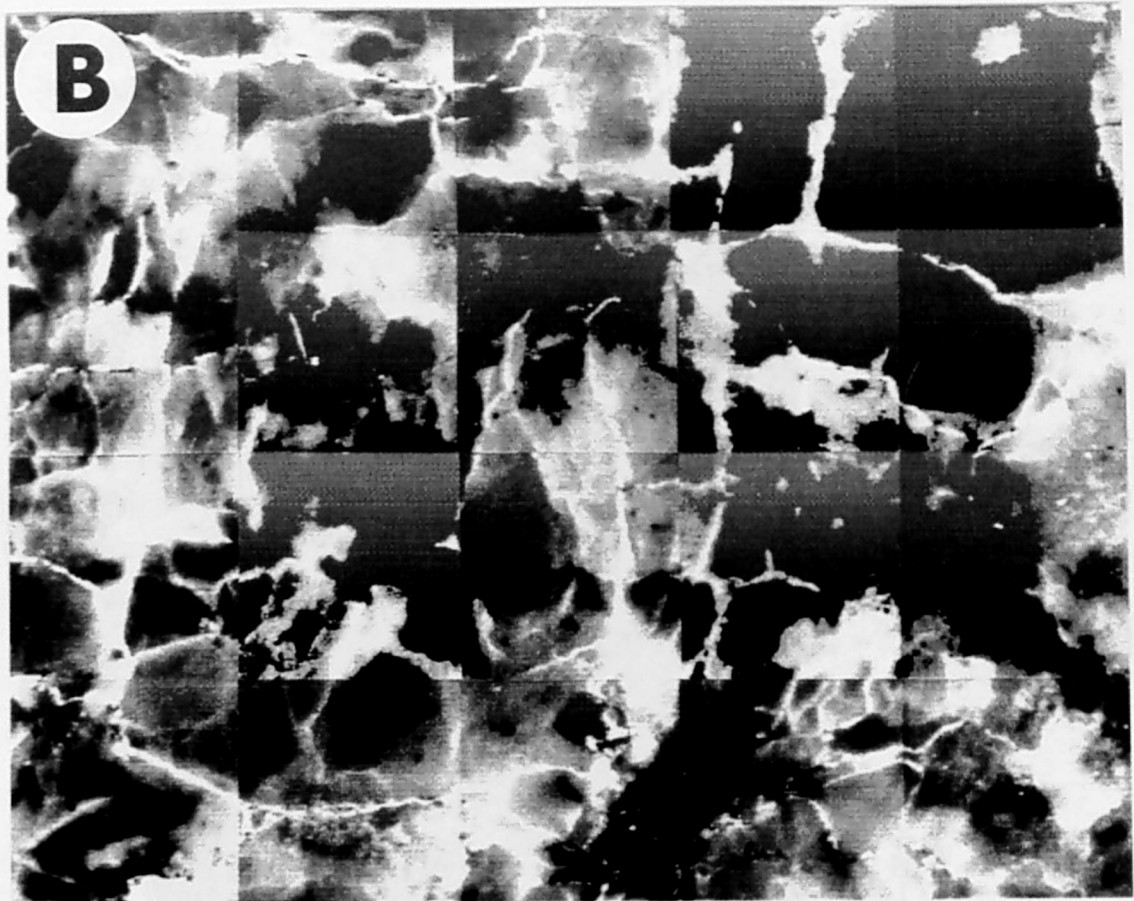


図3-6 花崗岩中の割れ目の連続処理の例

A: 連続処理した花崗岩（実線が解析した範囲，点線がB,Cと同じ領域を示す）

B: 入力した濃淡画像（5 mm×5 mmの範囲の画像を20枚貼り合わせたもの）

C: 割れ目を抽出した細線化画像（Bと同じ領域）



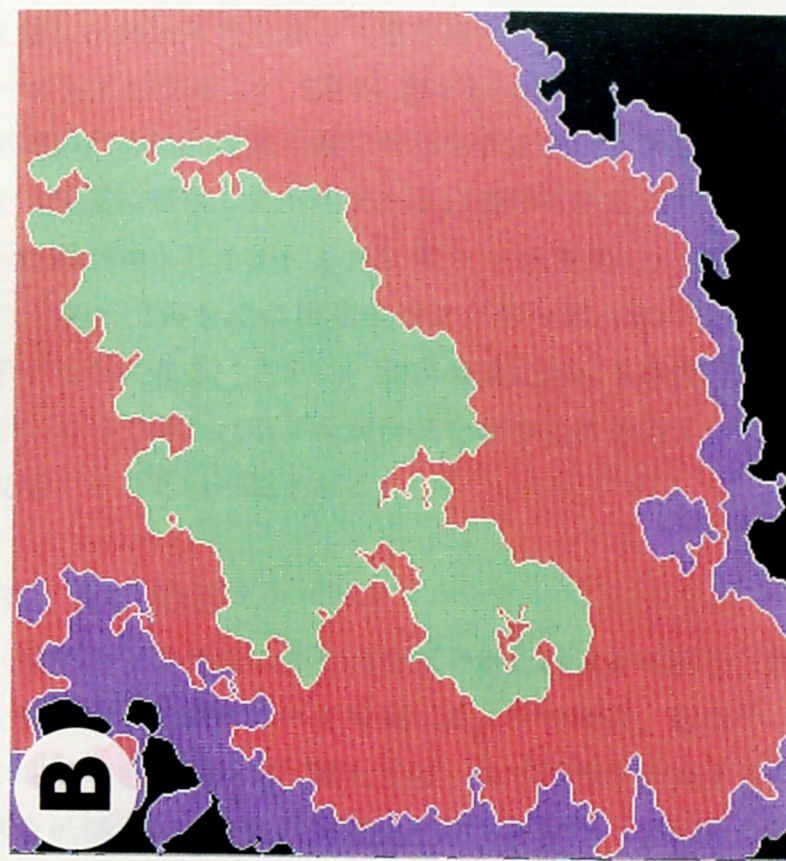
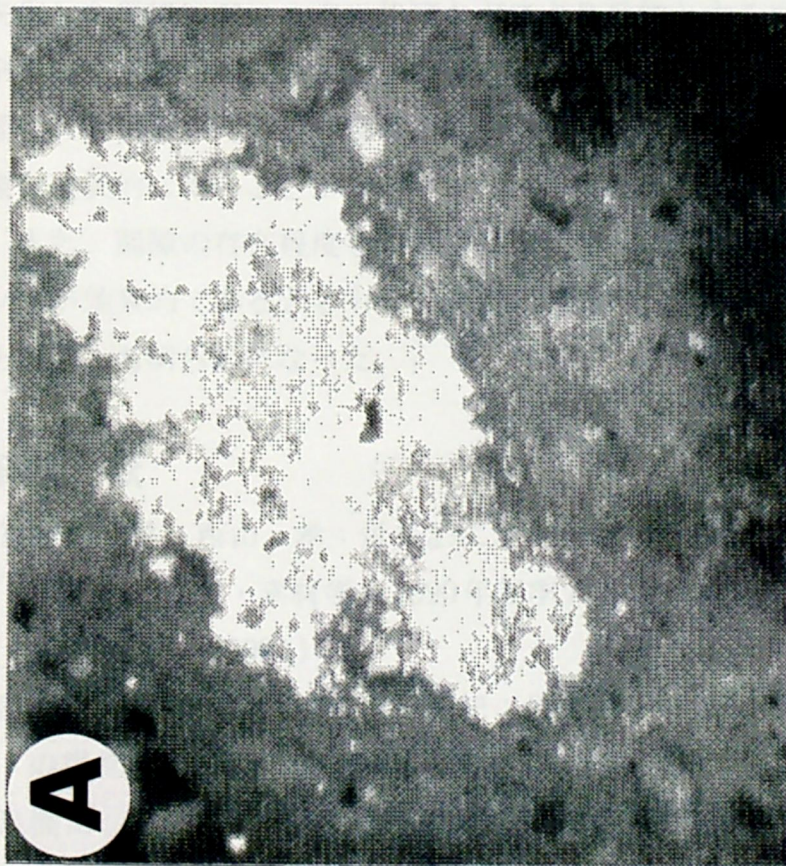


図3-7 岩石中の微細な間隙の画像処理例

A:入力した濃淡画像, B:風化程度のカラースケール表示

(黒:しきい値0~15, 紫:しきい値16~31, 赤:しきい値32~79, 緑:しきい値80~255)

(図3-7A)について、平坦化処理を行うことにより細かい部分の影響を除いた後に、輝度変換処理と4値化処理によって、間隙の存在程度のカラーコンターマップを作成した(図3-7B)。これは間隙の多いところほど樹脂の浸透量が多いため発光量も多くなることを利用したもので、微小な間隙の存在状況を4段階に表現したものである。表示にあたってはしきい値の選択により異なった図が得られるが、しきい値0～15を黒に、16～31を紫に、32～79を赤に、80～255を緑に設定すると、黒→紫→赤→緑の順に間隙率が高い部分を示すことになる。さらに、測定領域における輝度の積算値を画素数で除することによって導かれる平均輝度値を求めることにより、間隙の存在量を定量的に表現することが可能となる。

### 3. 5 結言

蛍光法や染色法により可視化された画像を処理し、割れ目や間隙の存在程度を評価する手法について考察した。その結果、岩石やコンクリート中の割れ目や間隙の定量的測定に際しては、まず画像を入力する際には適切な方法でノイズを低減させ、さらに輝度値のヒストグラム情報を利用して入力した画像を鮮鋭化した後に、フィルター処理などにより目的とする岩石やコンクリート中の割れ目や間隙を抽出した。その後、抽出した画像を現実に近い形に補正し、処理された画像から必要な情報を解析することによって、種々の目的に応じた画像を選択的に得ることができることが判明した。

また、間隙の存在程度を定量的に表現するには、発光量のカラーコンターマップが効果的であるとともに、輝度の積算値から得られる平均輝度値が有効であることも明らかになった。

### 参考文献

- 1) 楠田 啓・西山 孝：蛍光法により得られた画像からの岩盤割れ目の抽出と解析，資源・素材学会1990年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集，309～310，(1990)
- 2) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀：蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出，資源と素材，106 [10]，573～579，(1990)
- 3) 楠田 啓・西山 孝：画像処理法による岩石中の間隙の抽出と解析，資源

- ・ 素材学会 1991 年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集, 309 ~ 310, (1990)
- 4) 楠田 啓・西山 孝：画像処理による岩石およびコンクリート中の間隙や割れ目の測定方法, 資源・素材学会 1992 年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集, 325 ~ 326, (1992)
- 5) Nishiyama, T. and Kusuda, H. : Identifications of Pore Spaces and Microcracks Using Fluorescent Resins, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol. 31, No.4, 369-375, (1994)
- 6) 小池克明・伊藤博之・大見美智人：リニアメント解析のためのランドサット TM データの画像処理に関する基礎的検討, 情報地質, No.14B, 25 ~ 40, (1989)
- 7) 日本工業技術センター編：コンピュータ画像処理入門, 総見出版, (1985)
- 8) 日本リモートセンシング学会出版委員会：パソコンによるリモートセンシングデータ解析, 啓学出版, (1989)
- 9) 西山 孝・前川慎喜・楠田 啓・北川元紀・中野欽一：染色したコンクリートの画像処理による観察, セメント・コンクリート論文集, No.43, 590 ~ 593, (1989)
- 10) Kusuda, H. Nishiyama, T, Kusakebe, Y. and Okimura, T. : Examination of Weathering of K-Feldspar in Granodiorite, Residual Soils in Japan, 51 ~ 54, (1990)
- 11) 楠田 啓・西山 孝：画像処理による微細な割れ目の抽出と評価ー風化した花崗岩と一軸圧縮試験を行った安山岩における微細な割れ目の解析ー, 応用地質, 34 巻, 6 号, 292 ~ 299, (1994)



## 第4章 花崗岩の風化に伴う間隙や割れ目の可視化と評価

### 4. 1 緒言

花崗岩の風化作用は著しく、時には地表下 15 m から 30 m におよぶ深層風化をすることが知られている。最近ではこの風化作用により形成された残積土を支持地盤としてさまざまな構造物が建設されるようになり、風化残積土の適切な評価法の確立が望まれている<sup>1)~6)</sup>。そこで蛍光法を用いて風化に伴う花崗岩中の間隙や割れ目の発達状況を観察し、次に画像処理により風化程度の定量ないし半定量的な評価を試みた<sup>7)</sup>。

### 4. 2 試料

#### 4. 2. 1 供試試料

試料は六甲花崗岩体と生駒花崗岩体から採取した。両岩体とも白亜紀に貫入した中粒～粗粒の花崗岩で、六甲花崗岩体では鶴甲地区で実施されたボーリングコアから 17 個を、生駒花崗岩体では交野市においてコアパックサンプラーを用い、気泡掘りにより乱さないように留意してとられたコアから 9 個を採取した<sup>8)</sup>。JIS に基づいて測定されたこれら試料の有効間隙率および吸水率は表 4-1 に示すとおりで、それぞれ 0.74%～46.3%，0.29～27.1% の範囲にある。

#### 4. 2. 2 蛍光剤を添加した樹脂の充填

花崗岩中の割れ目や間隙に樹脂を充填する際には、比較的風化程度の小さい岩石に近い試料と分解、変質の著しい土壌に近い試料に分けて充填した。岩石に近い試料では、2.2.2 で示したように、まず試料をメチルメタアクリレートの中に浸し、減圧を繰り返し十分に浸透させた後に、加熱、硬化させたものを切断、研磨した。土壌に近い試料では、試料が脆弱なために直接メチルメタアクリレートに浸すと粒子がルーズになり、崩壊するので、あらかじめ試料表面をエポキシ樹脂で固定し、その後、常温で硬化するように硬化剤を配合したメチルメタアクリレートに浸透させた。このようにして作製された試料は、ほぼ原形を維持した状態で樹脂が浸透しており、かつ気泡掘りにより採取されてい

表4-1 試料の有効間隙率と画像処理結果

	試料	有効間隙率 (%)	吸水率 (%)	割れ目長さ (mm/mm <sup>2</sup> )	粒子内間隙率 (%)		
					黒雲母	石英	長石
1	KT-1	0.77	0.30	1.0	0.1	2.4	12.4
2	KT-2	0.74	0.29	0.8	0.1	7.3	7.0
3	KT-3	3.89	1.53	2.7	1.5	12.6	19.3
4	TK-1	5.63	2.24	4.0	4.0	5.2	20.6
5	TK-2	7.97	3.19	4.0	8.0	5.1	34.4
6	TK-3	4.74	1.85	3.2	1.0	4.6	36.9
7	TK-4	7.01	2.83	4.1	3.1	6.1	29.8
8	TK-5	2.36	0.90	1.4	0.1	9.8	19.6
9	TK-6	3.09	1.20	2.5	2.3	7.6	35.9
10	TK-7	4.11	1.60	3.1	0.7	8.5	26.4
11	TK-8	4.90	1.92	3.1	3.2	6.3	19.7
12	TK-9	5.35	2.12	3.8	4.4	4.9	28.1
13	TK-10	4.77	1.88	3.1	2.2	10.3	18.7
14	TK-11	3.97	1.55	2.7	1.1	3.3	28.4
15	TK-12	5.83	2.33	3.6	4.1	9.4	35.2
16	TK-13	4.32	1.70	3.2	2.7	5.6	24.7
17	TK-14	3.70	1.44	3.3	0.9	7.2	22.4
18	TK-15	3.92	1.54	2.7	3.5	6.5	28.5
19	TK-16	3.61	1.41	2.4	4.0	13.5	28.3
20	TK-17	3.28	1.26	2.7	0.7	16.2	35.6
21	C1-2	44.1	20.52	5.2	32.8	20.4	
22	C2-4	46.3	27.11	5.6	42.1	18.8	
23	C3-4	44.7	17.82	5.4	49.4	13.3	42.2
24	C4-1	46.2	24.34	5.2	51.8	19.1	60.2
25	C5-3	39.8	14.17	4.5	11.5	19.3	54.3
26	C6-3	38.8	18.68	5.2	15.1	11.0	55.6
27	C7-4	33.1	13.54	5.0	9.2	9.7	40.6
28	C8-4	29.0	12.46	4.8	10.1	11.8	39.1
29	C8-5	28.4	11.67	4.3	5.3	12.3	36.0



ることも考え合わせると、きわめて乱れの少ない試料といえる。

#### 4. 3 実体顕微鏡または反射顕微鏡による観察

すでに述べたような方法により作製された試料には、微細な間隙にも樹脂は十分浸透しており、可視光と紫外線の照射により微細構造の観察が可能である。風化程度の異なる代表的な花崗岩を観察すると図 4-1 のようになる。新鮮な試料（有効間隙率 0.74 %）の可視光（図 4-1A）と紫外線照射（図 4-1B）による観察を比較すると、微細な割れ目、あるいは形成されつつある割れ目が識別される。とくに粒子境界にできた割れ目が目立ち、その他に微細で連続性が悪く、幅の狭い不鮮明な割れ目が多くみられる。有効間隙率が 8 % に達した試料では、粒子境界の割れ目や石英粒子中の割れ目は幅を持ち、連続性がよくなり、各粒子の結合力が弱くなっていることがわかる（図 4-1C, D）。さらに風化が進行し有効間隙率が 45 % になると、長石はもはや原形をとどめないほど変形し、石英も粒子内の割れ目の幅が広がり、溶蝕も進み、小さな丸みをおびた粒子に変わっているのが観察される（図 4-1E, F）。

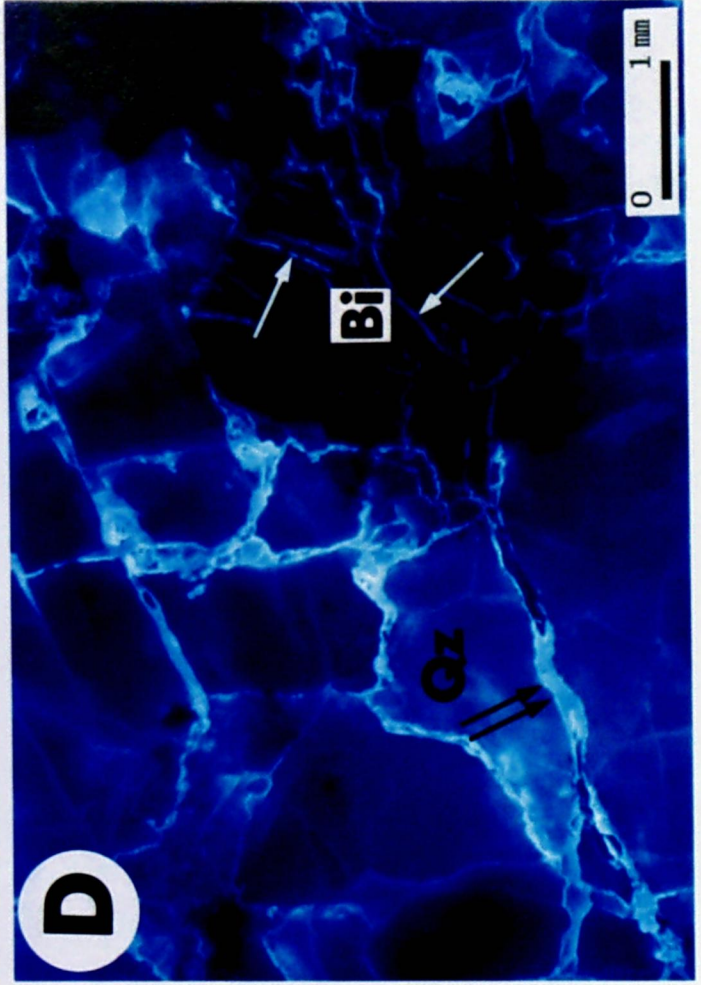
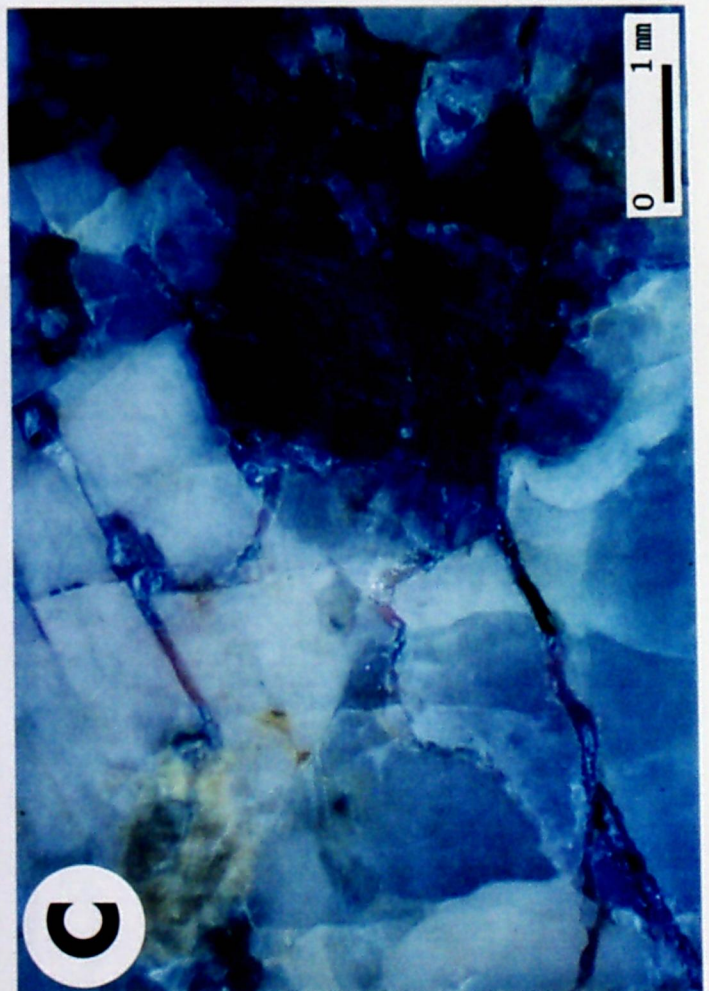
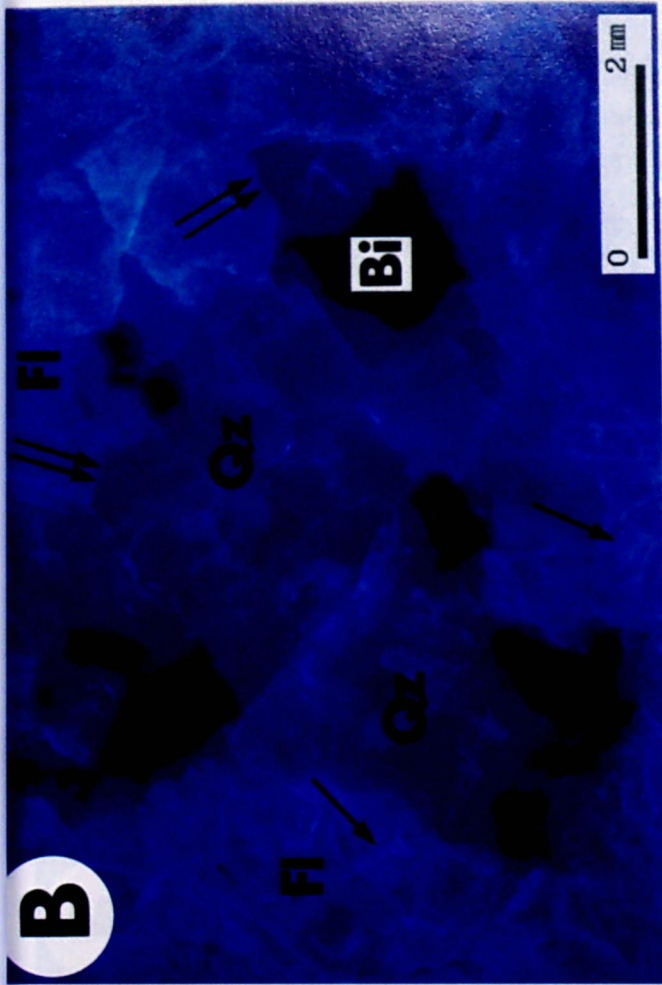
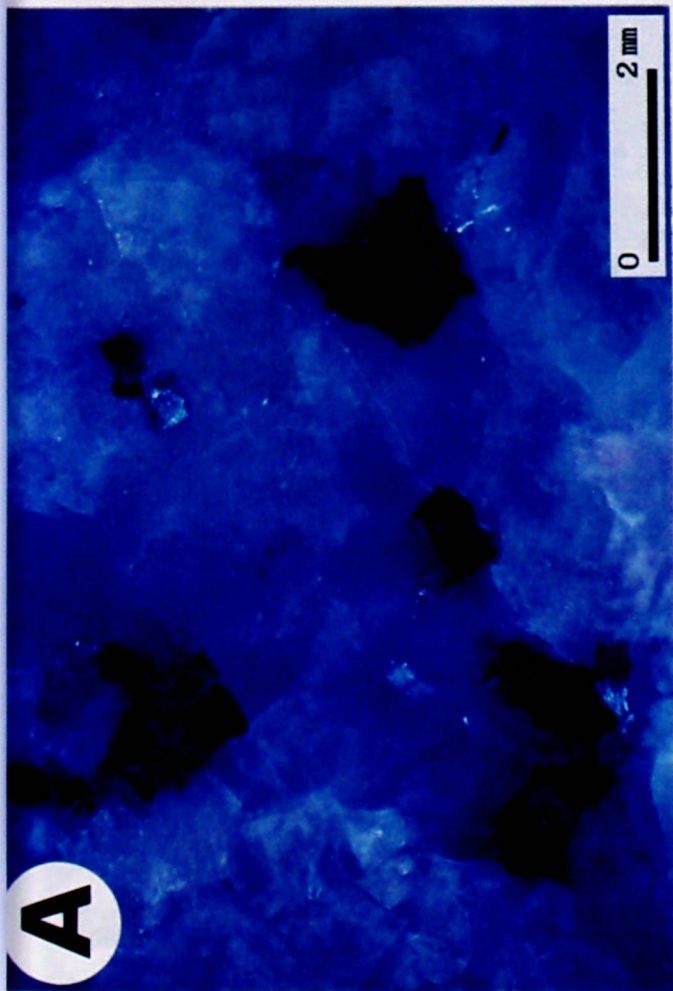
#### 4. 4 画像処理

画像処理法により (1) 割れ目の長さの計測、(2) 鉱物粒子内の間隙率の測定、(3) 鉱物粒子内の風化程度の測定を試み、割れ目の状況を定量的に把握した。

##### 4. 4. 1 割れ目の抽出と長さの計測法

割れ目を抽出し、その長さを計測するために図 4-2a のような操作手順を採用した。まず線状の部分の輝度を強調するために、入力した画像について、ヒストグラムの平坦化処理により画像のコントラストを強調し、次に Kirsch オペレータ、フィルター処理を行う。その後しきい値処理、ノイズ除去により割れ目の部分のみを抽出する。さらに割れ目の長さと方向を鮮明にするために、Hilditch の方法により細線化処理した。割れ目の分布状態を定量的に表現する方法としては、一定面積内に存在するすべての割れ目についてそれぞれの長さを測定し、その合計を面積で割り、単位面積に存在する割れ目の長さを求めた。

##### 4. 4. 2 鉱物粒子の風化程度の測定法





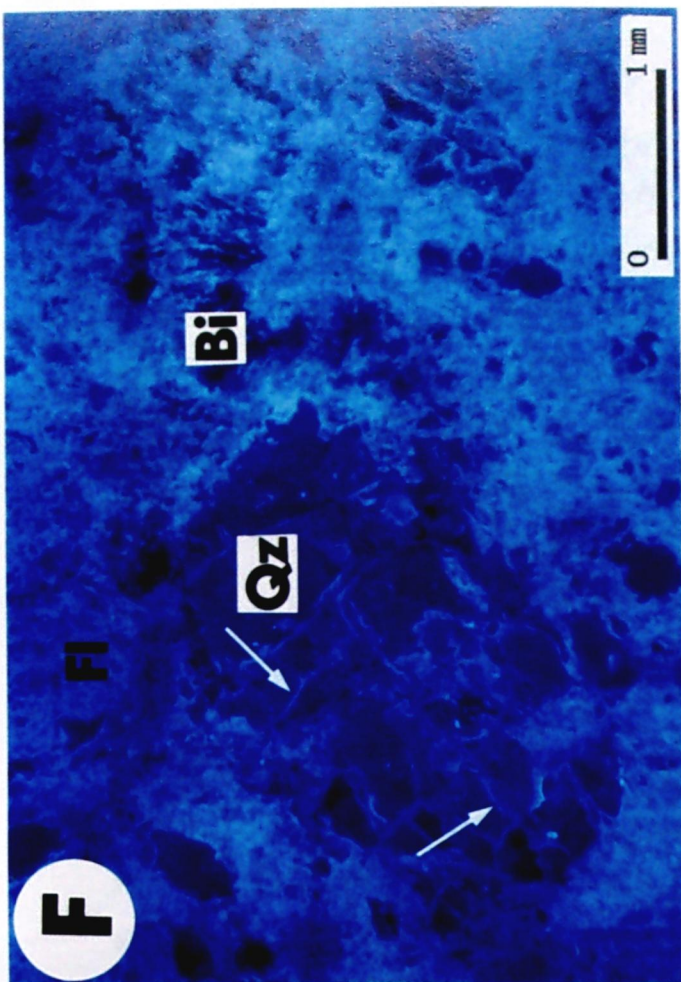
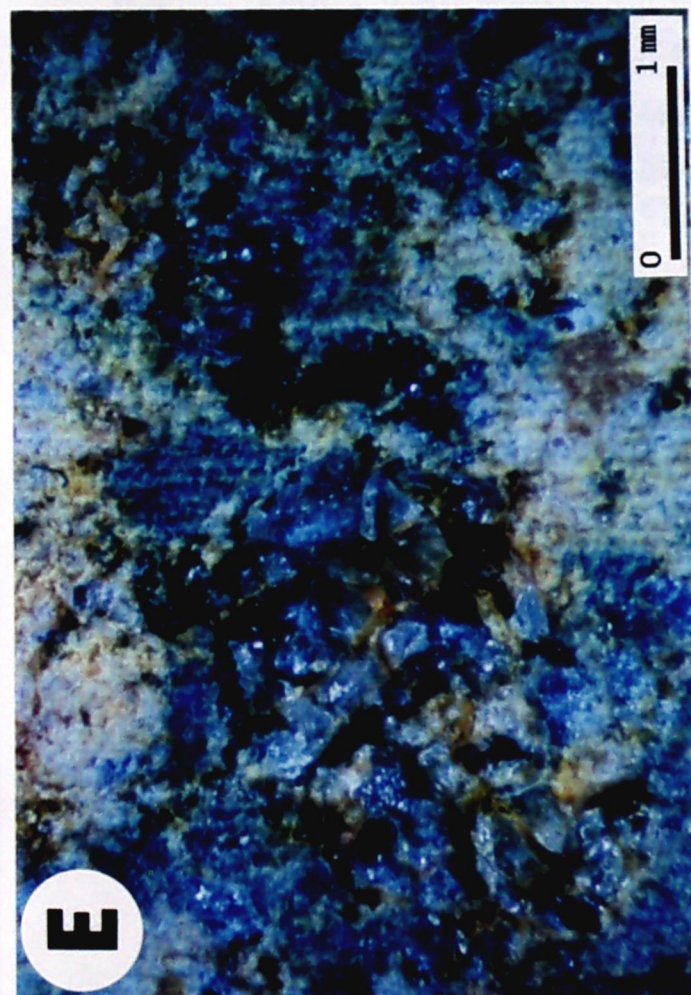


図4-1 蛍光剤を添加したメチルメタクリレートに浸透させた風化程度の異なる  
花崗岩の顕微鏡観察

A, B: 有効間隙率0.7%の花崗岩, 石英(Qz)と長石(Fl)の粒子境界部の割れ目(↑↑)と、長石粒子内の微細な  
割れ目(↑) (A: 可視光, B: 紫外線)  
C, D: 有効間隙率8%の花崗岩, 石英粒子(Qz)内の割れ目(↑↑)と、黒雲母粒子(Bi)内の間隙, (C: 可視光,  
D: 紫外線)  
E, F: 有効間隙率45%の花崗岩, 石英粒子(Qz)内に発達した間隙(↑), (E: 可視光, F: 紫外線)

#### (1) 鉱物粒子内の間隙率

鉱物粒子内に存在する間隙率の測定は、まず目的とする鉱物粒子の中で処理領域を設定し、画像強調、エッジ保存平滑化処理の繰り返しによって、鉱物粒子内の間隙の部分とその他の部分との輝度の差をより明確にした画像を作成した。さらに得られた画像に適当なしきい値により間隙の部分のみを抽出し、鉱物粒子内の間隙率を求めた（図 4-2b）。この測定法では、粒子内の間隙率はしきい値によって変動するので、あらかじめ JIS により測定された間隙率の異なる 5 個の岩石試料を基準にしてしきい値を設定したが、試料による違いはほとんど認められなかった。なお、JIS による有効間隙率は体積率であり、画像処理により求められる間隙率は面積率であり、基本的には補正が必要である。しかしながら、本研究では、それらの相関性のみを問題にしているのでそのままの表示にとどめた。

#### (2) 風化程度のカラーコンターマップ表示

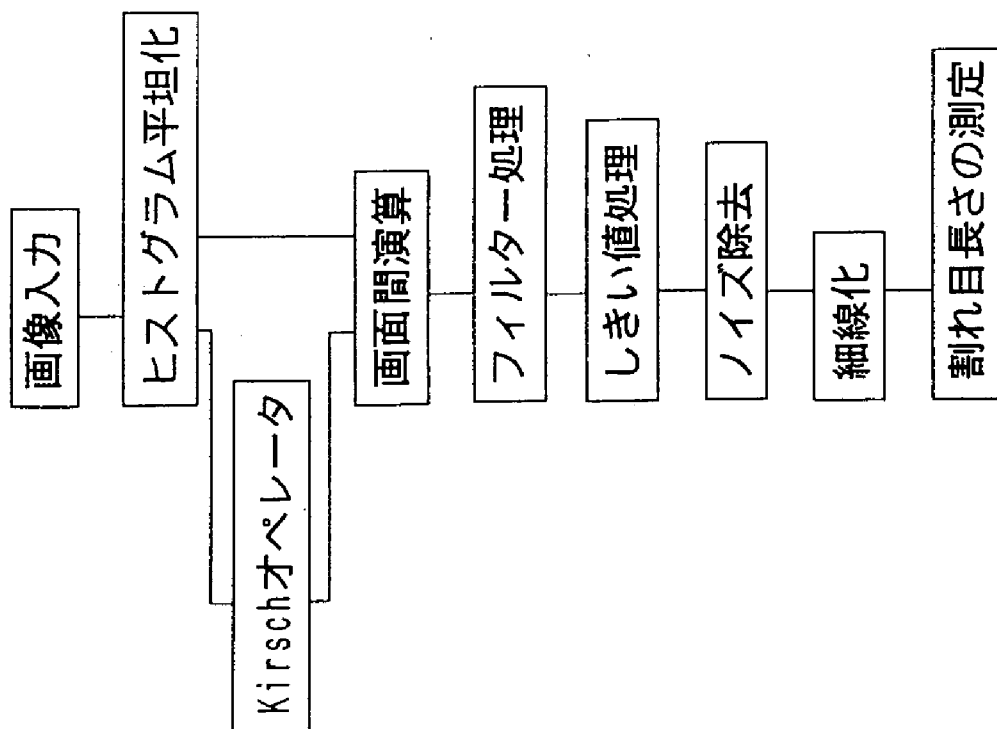
風化作用をもっとも単純化すると、まず物理的作用によって割れ目が形成され、次にできた割れ目の部分から両側に漸次化学的風化作用が進行していくものと考えられている。したがって間隙には識別の比較的容易な割れ目と、主に化学的な作用により風化帯から未風化帯へ漸移的に変化している部分とが複雑にからまって形成されているものと推察される。この漸移的な間隙には間隙の量に応じて樹脂が浸透するものと推察され、浸透した樹脂の量は発光量、すなわち輝度の変化として現れていると思われる。そこで、輝度変化の状況をより鮮明にするために 4 値化処理を行い、カラーコンターマップにより段階的に表示した（図 4-2c）。

### 4. 5 割れ目と間隙の観察結果と考察

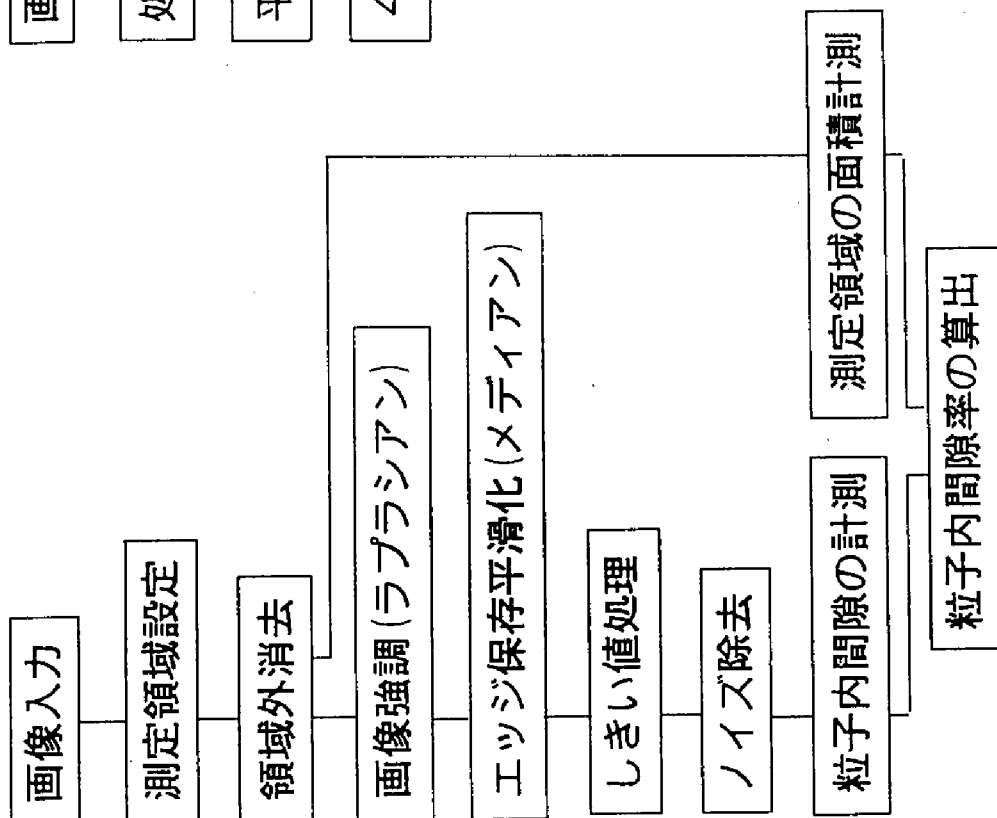
#### 4. 5. 1 割れ目の長さと同隙率

風化程度の異なる 29 試料を用いて花崗岩の風化現象の定量的把握を試みた。各試料の代表的なところを 2 ヶ所選り、3.4 で述べた手順により単位面積当りに含まれる割れ目の長さを求めた（表 4-1）。まず、割れ目の長さと JIS により求められた有効間隙率とを比較検討すると、割れ目の長さの進展は有効間隙率が 6 % まではよい相関関係を示しているが、6 % を超えると有効間隙率に関係なく 1 mm<sup>2</sup> あたり 4 ~ 6 mm 程度の割れ目が含まれた状態で落ち着いてい

(a)



(b)



(c)

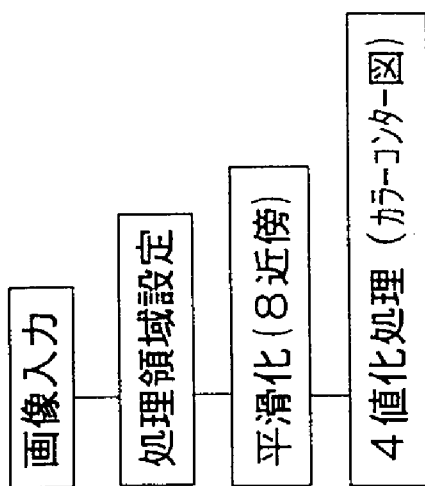


図4-2 風化花崗岩の画像処理フロー

(a)割れ目の抽出と割れ目長さの測定, (b)鉱物粒子内の間隙率の測定,

(c)鉱物粒子内の風化程度のカラ一表示

る（図 4-3）。このことは画像処理の過程で長さを重視し、幅は無視していることから判断すれば、有効間隙率が 6 %を超えた試料では割れ目の長さは増加せずに幅が広くなることにより、有効間隙率が増えることを示唆している。

次に、割れ目の長さや岩石の強度について考察した。岩石の吸水率と一軸圧縮強度との間には図 4-4 に示すような関係があることが報告されている<sup>10)</sup>。そこで、この図から 29 試料の一軸圧縮強度を推定した。その結果、吸水率から推定される 29 試料の一軸圧縮強度は 50 ~ 2,700 kg/cm<sup>2</sup> 程度であった。さらにこの推定一軸圧縮強度と割れ目長さとの関係を比較検討したところ、両者の間には負の相関関係が認められた（図 4-5）。このことから、割れ目長さは岩石の強度を評価する指標としても利用することができると考えられる。

#### 4. 5. 2 鉱物粒子内の間隙率の測定と風化程度の測定

一般に花崗岩の化学的風化が進行すると、長石類では炭酸化された水の水和作用により、粘土鉱物、珪酸、さらにカリウムあるいはナトリウム、カルシウムの炭酸塩に変わり、炭酸塩は溶液として取り除かれる。黒雲母では緑泥石、粘土鉱物が形成される<sup>9)</sup>。石英はもっとも化学的風化作用を受けにくい鉱物とされるが、漸次溶脱されていく。また化学的風化作用は結晶間の結合力を弱め、分解を進めるので、風化作用が進むと間隙が増加すると考えられている。そこで、長石、黒雲母、石英の粒子内に観察される間隙を画像処理により評価した。画像処理によって求められた粒子内間隙率と JIS により測定された岩石の有効間隙率との関係を比較すると、長石は岩石全体の有効間隙率が小さいものでも他の鉱物種に比べると粒子内間隙率は 20 % 程度と多く、有効間隙率が大きくなるとさらに粒子内間隙率も増加するのが認められる。黒雲母は岩石全体の有効間隙率が 30 % までは粒子内間隙率には大きな変化はみられないが、有効間隙率が 30 % を超えると急激に増加し、有効間隙率 46 % の試料では粒子内間隙率が 50 % 以上の粒子も存在する。石英は全般に粒子内間隙率は小さく、岩石全体の間隙率が 40 % を超えた試料でも粒子内間隙率は 15 % 程度である（図 4-6）。

次に鉱物種による風化作用の進展状態をより詳しく検討するために、鉱物種ごとに粒子内間隙率を 4 段階に分けてカラーコンターマップを作成した。図 4-7 はその一例で、岩石全体の有効間隙率が異なる 3 つの試料についてそれぞ



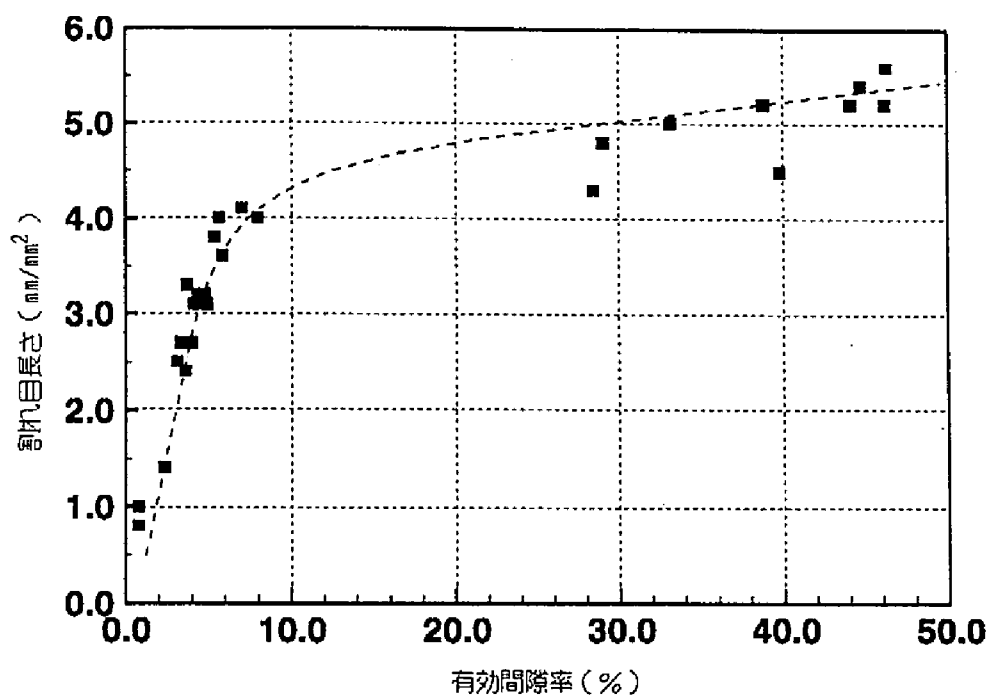


図4-3 割れ目長さと岩石の有効間隙率との関係

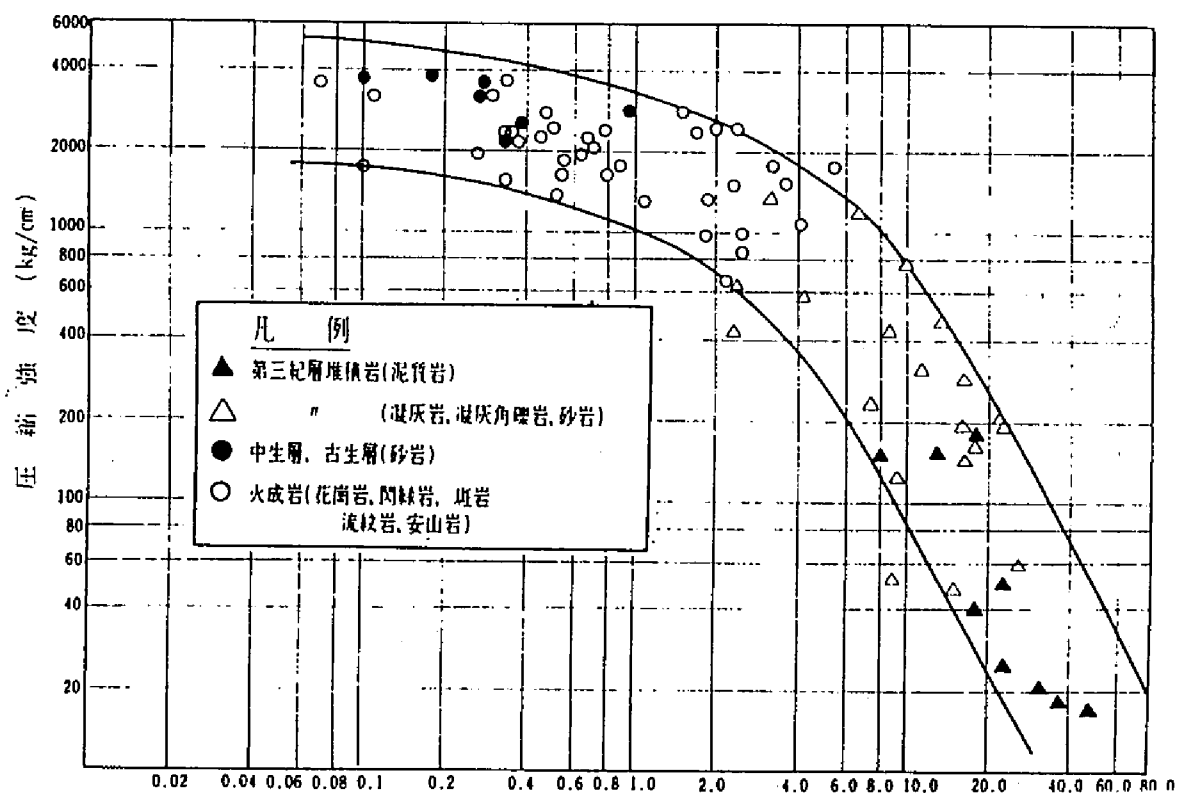


図4-4 岩石の吸水率と一軸圧縮強度との関係(菊地(1990))<sup>10)</sup>

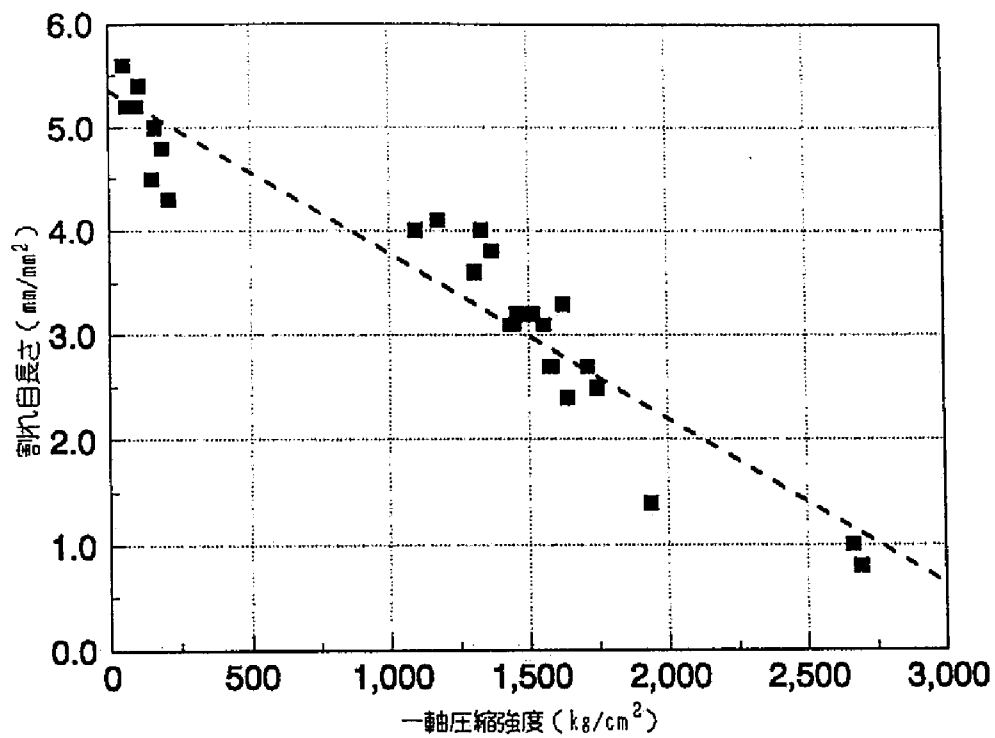


図4-5 割れ目長さと吸水率から推測した一軸圧縮強度との関係

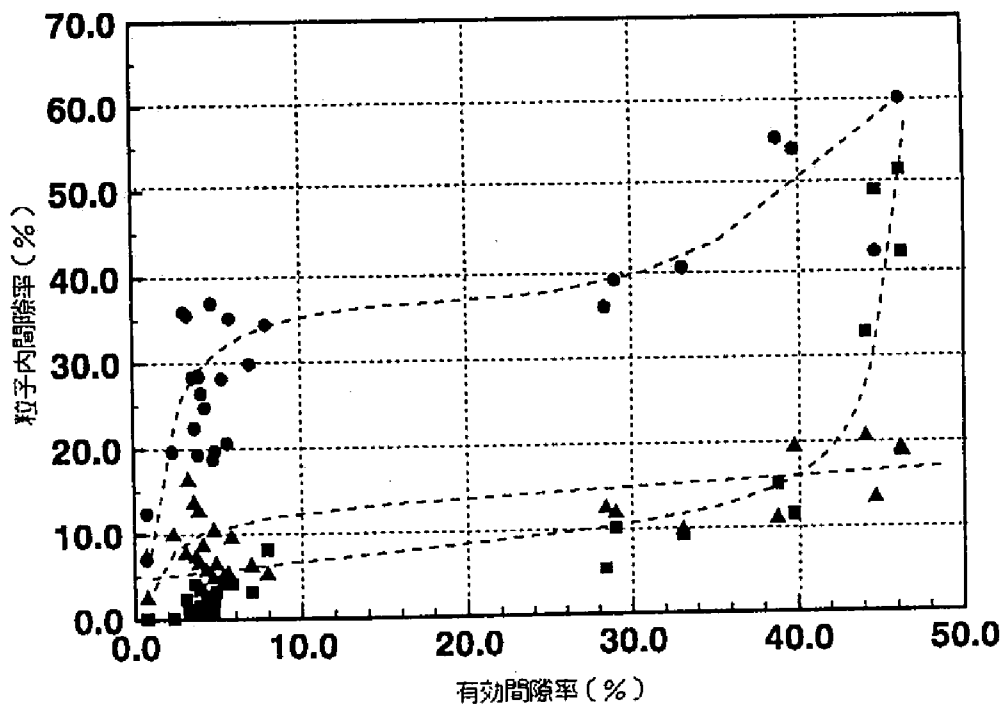


図4-6 石英、黒雲母、長石における粒子内間隙率と岩石の有効間隙率との関係  
(▲: 石英, ■: 黒雲母, ●: 長石)



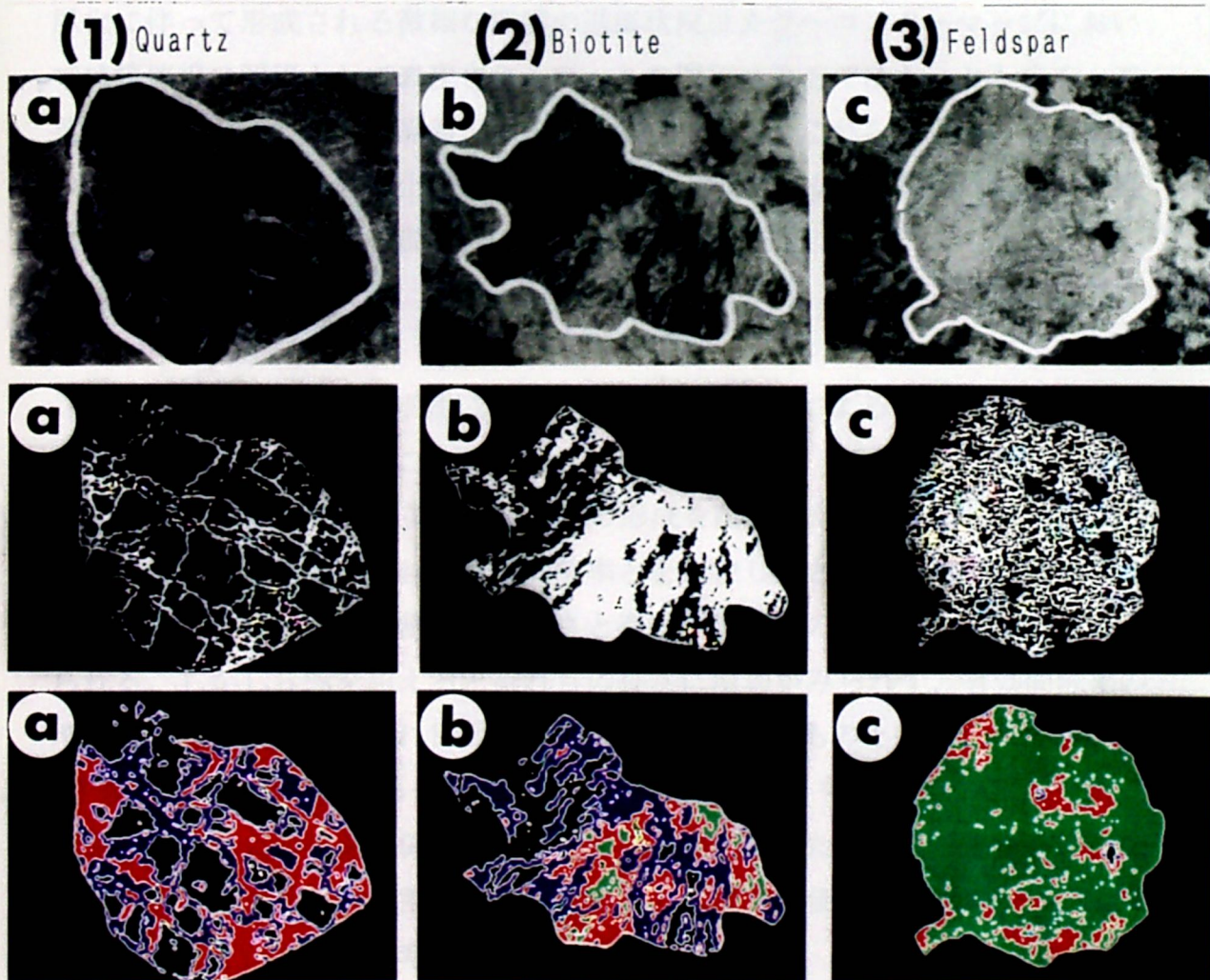


図4-7 石英、黒雲母、長石の各鉱物粒子内の画像処理結果

(1)石英, (2)黒雲母, (3)長石

(a:原画像, b:鉱物粒子内の間隙を抽出した画像, c:風化程度のカラーコンターマップ)

(黒: しきい値0~15, 紫: しきい値16~31, 赤: しきい値32~79, 緑: しきい値80~255)

れの試料に含まれる長石、黒雲母、石英の代表的な粒子の間隙の分布状態を4段階に区分し表示したものである。いずれの鉱物種においても、割れ目から離れるに従い、漸次間隙が減少しており、長石の粒子では2方向の、黒雲母の粒子では1方向の微細な割れ目から風化が進展している状況がよくわかる。また風化に伴って形成される微細な間隙の進展状況はカラーコンターマップにおいては等値線の間隔として表現されるが、この間隔は長石ではもっとも広く、石英では狭くなっており、黒雲母は中間的存在である。これらの現象はそれぞれの鉱物の割れ目からの風化浸度を表しており、すでにふれた花崗岩について推察されている風化機構を視覚的にとらえたものである。

#### 4. 6 結言

間隙率の異なる風化花崗岩29試料について蛍光法による観察ならびに画像処理によって次のようなことが明らかになった。

(1) 花崗岩の風化に伴う微細な割れ目の形成を調べるために、割れ目の長さとは従来の方法により測定された有効間隙率とを比較したところ、有効間隙率が6%程度までは一定面積の割れ目の長さとは有効間隙率との間により相関関係がみられる。しかし6%を超えると割れ目の長さには増加がみられず、有効間隙率の増大は6%を超えると割れ目の幅による影響が大きいものと推察された。

(2) 吸水率から推定される一軸圧縮強度と割れ目長さとを比較検討したところ、両者の間には負の相関関係があることが明らかになった。このことから、画像処理によって求められる割れ目長さは岩石の強度を評価する指標の一つとして利用できると考えられる。

(3) 画像処理によって求められた長石、黒雲母、石英の鉱物粒子内間隙率は、長石では風化の初期（有効間隙率の小さい試料）においても間隙の発達が著しく、最終的には粒子内間隙率が50%を超える粒子も認められる。一方石英はもっとも風化の進んだ状況でも粒子内間隙率は小さい。黒雲母は両者の中間的存在である。また割れ目からの風化の進行状況を観察すると、石英が浅く、長石がもっとも深くまで影響を受けていることが明らかになった。これらの事実から、蛍光法と画像処理法を組み合わせることによって風化機構が可視化され、より鮮明にとらえられるようになった。

## 参考文献

- 1) 西田一彦：風化残積土の工学的性質，鹿島出版会，(1986)
- 2) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀：蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出，資源と素材，106[10]，573-579，(1990)
- 3) 楠田 啓・西山 孝・日下部吉彦・沖村 孝：花崗閃緑岩中のカリ長石の風化について，土質工学会風化残積土に関するシンポジウム論文集，85-88，(1988)
- 4) 嘉門雅夫：土質の立場からみたマサ土の風化，文部省科研費報告書「マサ土地帯における土砂災害の予測と防止に関する研究」，32-33，(1986)
- 5) 西田一彦・青山千彰：花こう岩風化層の間隙径分布と水分吸着特性について，応用地質，20[ 1 ]，3-12，(1979)
- 6) Nishida K. : Physical and Engineering Properties of Undisturbed Specimen of Decomposed Granite Soil, Proc. 8th. Asian Regional Conf. S.M.F.E., Vol.2, 196-198, (1987)
- 7) 楠田 啓・西山 孝・西田一彦：花崗岩の風化に伴う微小割れ目の形成と間隙の発達について，土質工学会論文報告集，32[2]，169-175，(1992)
- 8) 土質工学会風化残積土の物理的性質研究委員会：サンプリングと採取試料の品質評価（その1），土質工学会風化残積土に関するシンポジウム論文集，1-4，(1988)
- 9) Carroll D. : Rock weathering, Plenum Press, New York-London, (1970)
- 10) 菊地宏吉：地質工学概論，土木工学社，(1990)

## 第5章 花崗閃緑岩の風化に伴うカリ長石粒子 の変化状況の可視化と評価

### 5. 1 緒言

カリ長石は風化作用によってカオリンなどの粘土鉱物に変質するが、その変質の詳細な過程については必ずしも明らかにされていない。そこで、風化の程度の異なる花崗閃緑岩試料に含まれるカリ長石を染色し、画像処理することによりカリ長石の粒子の形状や大きさの変化を調べた。さらに走査型電子顕微鏡により風化した長石粒子表面の微細な構造を観察し、画像処理の結果と併せてカリ長石の風化のプロセスについて考察した<sup>1)2)</sup>。なお、カリ長石を研究対象としたのは、2. 3で述べたようにカリ長石にはコバルチ亜硝酸ナトリウムにより簡単に着色する性質があるからである<sup>3)</sup>。

### 5. 2 試料

研究で用いた試料は、神戸市灘区青谷地区で行われた深度 30 m のボーリングコアから採取したもので、深さの異なる 5 つの試料（地表から 1.6m, 6.2m, 10.6m, 19.4m, 28.3m）を供試試料とした。X線粉末回折分析によると主要構成鉱物は石英、斜長石、カリ長石、黒雲母および角閃石で、他に試料によっては少量の緑泥石を伴うものもある。

### 5. 3 画像処理によるカリ長石の抽出

2. 3で述べたような方法で試料中のカリ長石を黄色に染色した後、画像処理によりカリ長石の部分だけを抽出した（図5-1）。画像処理は、まず CCD カメラにより赤および青のフィルターを通した 2 つの画像を取り込み、次に赤フィルターを通した画像から青フィルターを通した画像を減算し、これを適当なしきい値で 2 値化した（図5-2）。

さらに、2 値画像についてカリ長石粒子の数、面積、周囲長、形状などを計測した。数、面積および周囲長の計測に際しては、きわめて小さい画素数のものは処理中に生じたノイズとの区別が困難になるので、画素数 10 以下のもの



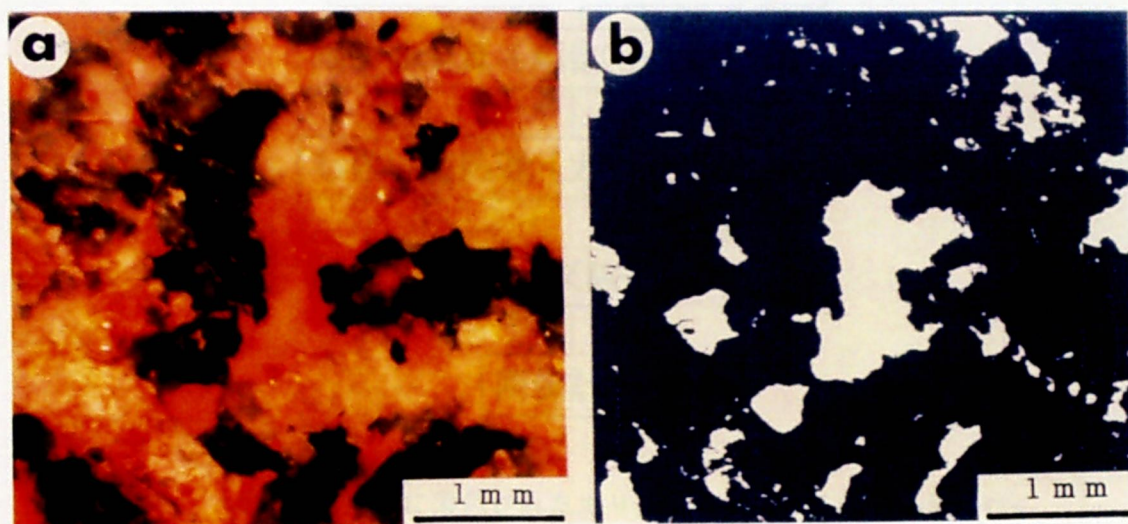


図5-1 黄色に染色されたカリ長石の画像処理による抽出  
a:黄色に染色されたカリ長石を含む試料, b:抽出されたカリ長石

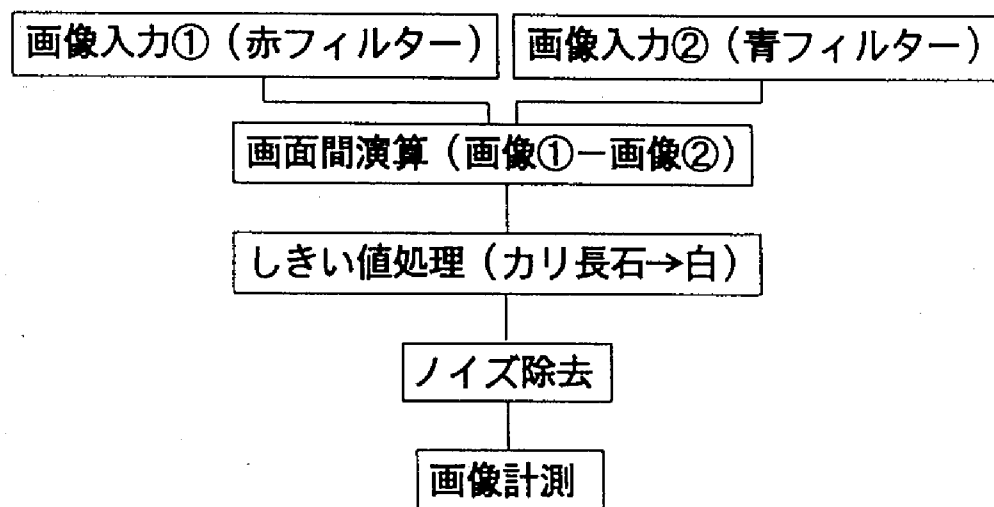


図5-2 黄色に染色されたカリ長石を抽出する画像処理フロー

は画像計測の対象外とした。また、形状係数については、顕微鏡の倍率や CCD カメラの解像度などを考慮して画素数 200 以下の小さい粒子については画像計測の対象外とした。

深さの異なる試料について得られたカリ長石の 2 値画像は図 5-3a ~ e のようになり、カリ長石の形状や分布状況が試料により異なっているのがわかる。

## 5. 4 風化に伴うカリ長石の変化

風化は一般に地表部から地下へ向かって進むと考えられるので、深さを風化のパラメータとし、カリ長石の粒子数、大きさ、形状がどのように変化するかを調べた。なお、カリ長石の形状の変化をみるために形状係数として次のようなパラメータを使用した。

$$(\text{形状係数}) = \frac{(\text{周囲長})^2}{(4 \pi \times \text{面積})}$$

この形状係数は円の場合 1 となり、物体の凹凸が増え形状が不規則になるにつれて大きくなる。

### (1) 深さに伴うカリ長石の粒子数の変化

深さ 28.3m から 1.6m までのカリ長石の粒子数の変化を示すと、図 5-4a のようになり、粒子数は深度が浅くなるにつれて直線的に増加しているが、その後 1.6m の地表に極めて近い部分では急激に減少している。

### (2) 深さに伴うカリ長石の大きさの変化

試料中にカリ長石のしめる割合は深さ 28.3m から 10.6m までは大きな変化はなく、地表近くで減少している（図 5-4b）。粒子面積の平均値でみると、地表に近づくにつれ減少している（図 5-4c）。周囲長については、その合計は深さ 28.3m から 10.6m の範囲でわずかに増加した後に減少しており（図 5-4d）、各粒子の平均周囲長は地表に近いほど次第に小さくなっている（図 5-4e）。

### (3) 深さに伴うカリ長石の形状の変化

形状係数と深さとの関係を示したのが図 5-4f である。この図から、地下深部の方に形状が単純なものが多く、地表に近づくにしたがって形状が複雑になる傾向がみられる。しかしながら地表に極めて近い部分（深さ 1.6m）では、再び形状が単純化している。

以上のことをまとめると、カリ長石は風化が進むにつれて、すなわち深部か

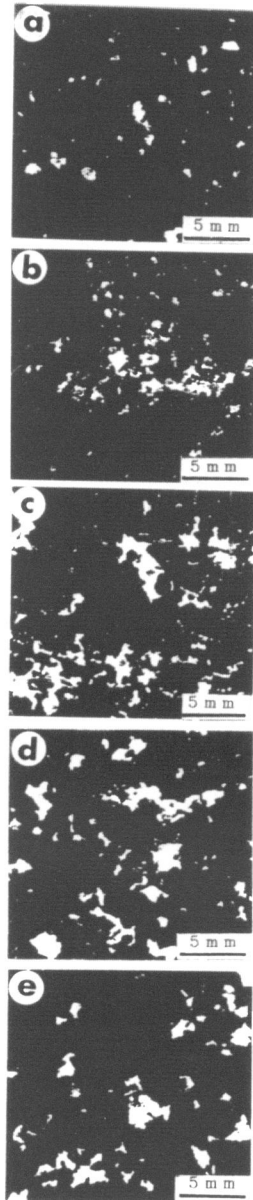


図5-3 各深さから得られた試料の画像処理結果（カリ長石：白色部）  
a:-1.6m, b:-6.2m, c:-10.6m, d:-19.4m, e:-28.3m



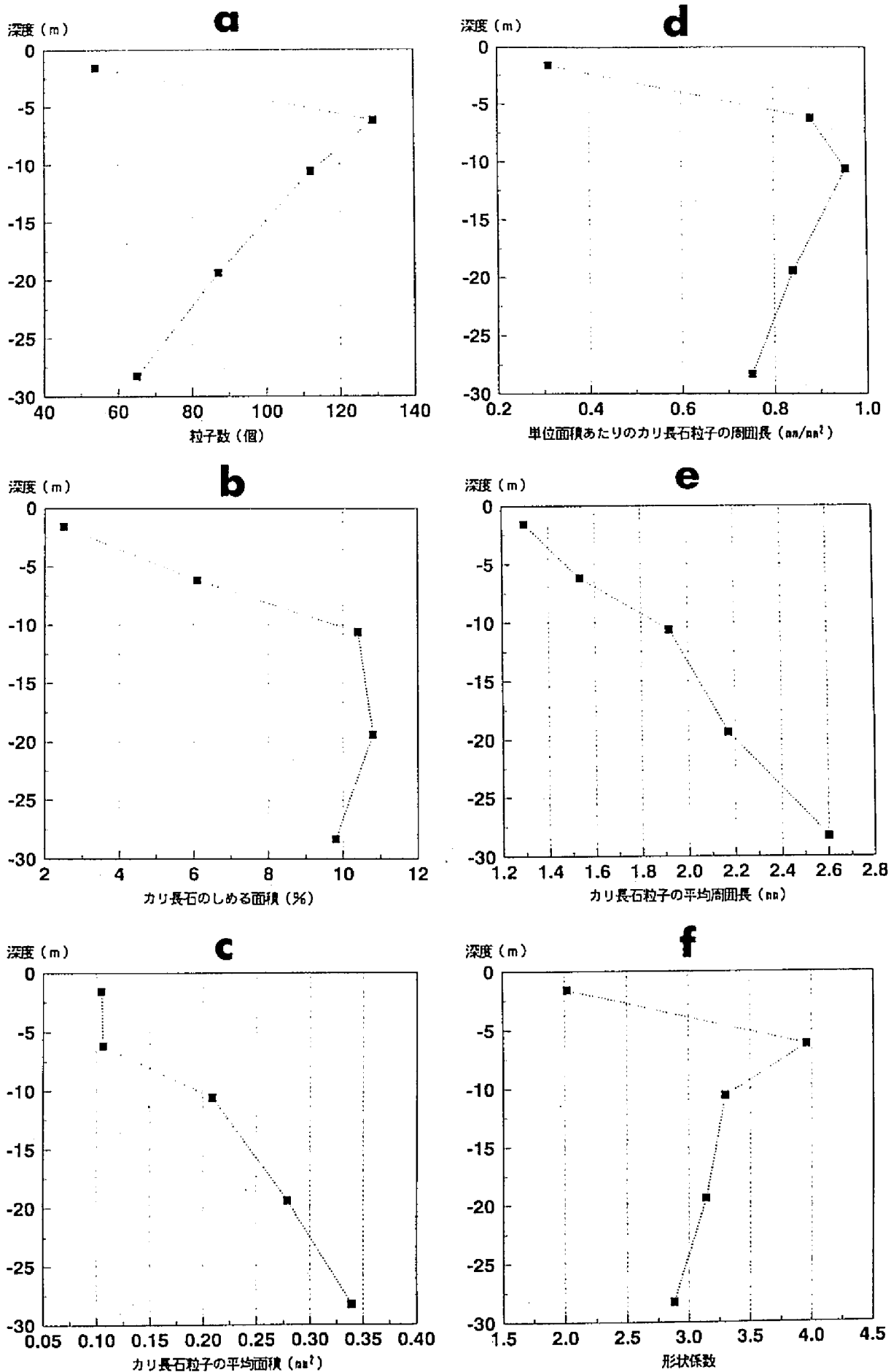


図5-4 深さに伴うカリ長石の粒子数、大きさ、形状の変化

(a)粒子数, (b)カリ長石のしめる面積, (c)カリ長石粒子の平均面積, (d)単位面積あたりのカリ長石粒子の周囲長, (e)カリ長石粒子の平均周囲長, (f)形状係数

ら地表に向かうにしたがって形状は不規則になり、粒子が分割されるために数は増加し、次第に小さい粒子の集合になっていくことが考えられる。さらに風化が進行した表土の部分では粒子数が急激に減少し、形状係数が小さくなっていることから、非常に小さく分割されたカリ長石の粒子が丸くなり、やがて消失することを示していると思われる。これらの関係を定性的に図示すると図5-5のようになる。

## 5. 5 走査型電子顕微鏡による風化した長石粒子表面の観察

染色処理および画像処理を組み合わせることによりカリ長石の風化に伴う外形の変化を推察することができるが、粒子表面の観察は不可能である。そこで走査型電子顕微鏡により風化した長石粒子表面の微細な構造を観察した。試料は地表部のマサ土の部分からハンドピッキングにより長石だけを採取したものを使用した。また比較のためにペグマタイト脈から採取した新鮮な長石をクラッシャーで破壊し、その破断面を1 : 1の沸化水素酸で腐食させ、粒子表面の観察を行った。

走査型電子顕微鏡による観察は図5-6に示すとおりで、風化を受けた長石では、粒子表面に小さい凹みが観察される。このような凹みは連続性を持っていることが多く、また分布は不均一で、特定の部分に集中している。このような表面形状は沸化水素酸により腐食した試料にもみられる（図5-6c）。このことから、これらの凹みの部分は長石粒子に存在する微小な弱線と推察され、画像処理の結果から推察されたカリ長石粒子の分割は、このような弱線の部分から進行していくものと考えられる。

## 5. 6 結言

花崗閃緑岩中のカリ長石を染色し、画像処理することにより、風化に伴うカリ長石の形状や大きさの挙動を把握することが可能となった。すなわち、カリ長石は風化が進行するにつれて、一般に粒子の大きさは小さくなり、形状は複雑になることが明らかになった。さらにもっとも風化が進んだ段階では形状は単純に、数は減少することが判明した。また走査型電子顕微鏡による観察から、風化を受けた長石の表面には微小な凹みをなす弱線が観察され、この凹みの部分から風化が進行しているのではないかと考えられる。

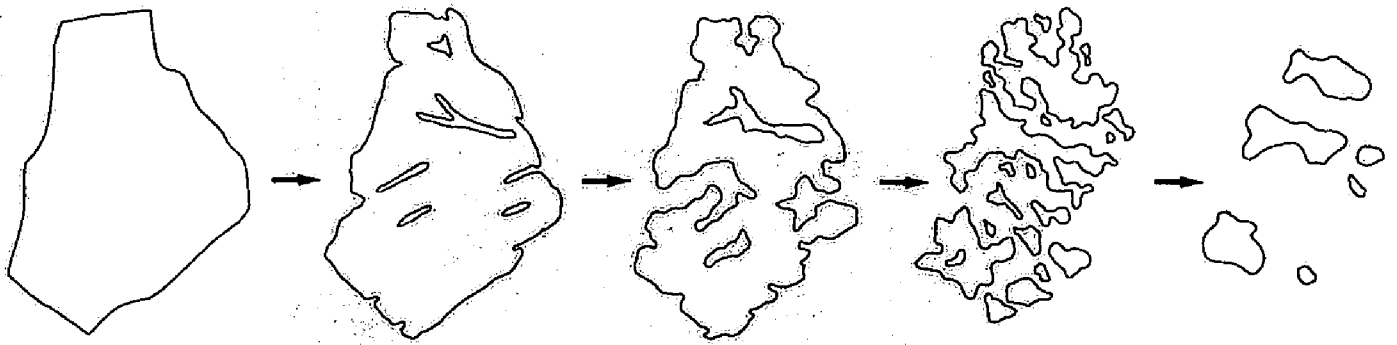


図5-5 カリ長石の風化のプロセスの模式図

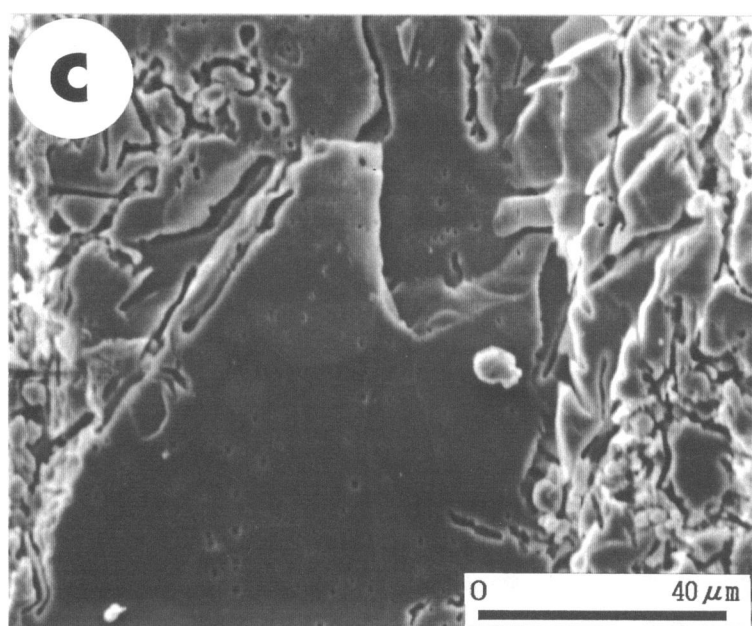
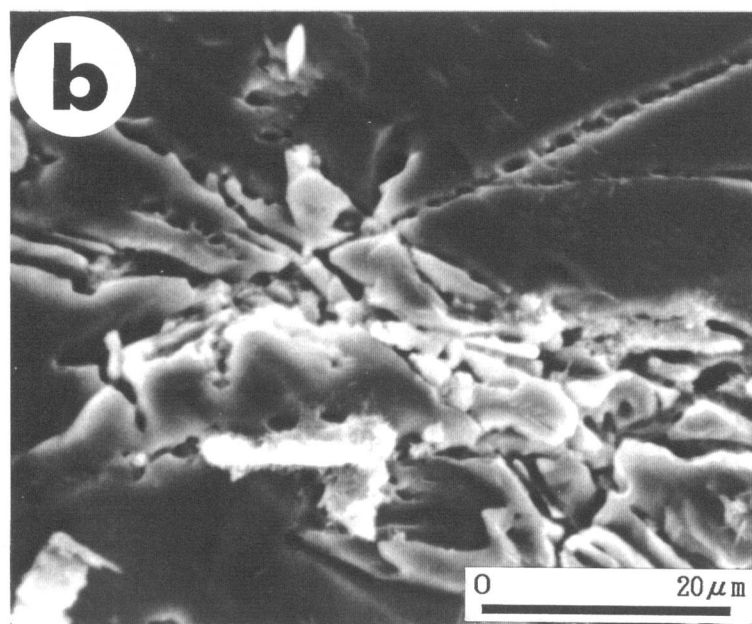
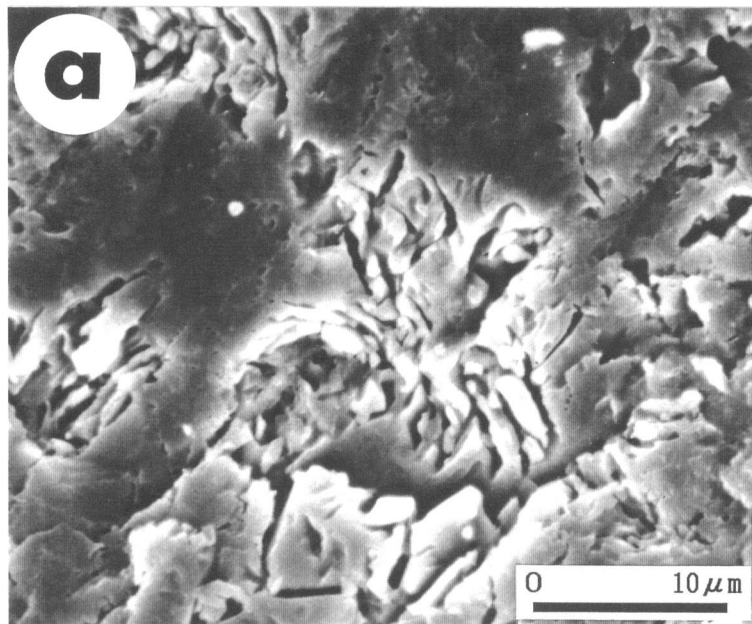


図5-6 走査型電子顕微鏡による長石粒子表面の観察

a,b:風化した長石粒子の表面, c:沸化水素酸により腐食した粒子の表面

## 参考文献

- 1) Kusuda, H., Nishiyama, T. Kusakabe, Y. and Okimura, T. : Examination of Weathering of K-Feldspar in Granodiorite, Residual Soils in Japan, 51-54, (1990)
- 2) 楠田 啓・西山 孝・日下部吉彦・沖村 孝：花崗閃緑岩中のカリ長石の風化について，土質工学会風化残積土に関するシンポジウム発表論文集，85-88, (1988)
- 3) Bailey and Stevens, R.E.: Selective staining of K-feldspar and plagioclase on rock slabs and thin sections, Am. Mineral., 45, 1020-1025, (1960)



## 第6章 凝灰岩の経年変化による間隙および割れ目の可視化と評価

### 6. 1 緒言

風化現象は岩石の種類によって、また水の供給、温度などの環境条件によって大きく影響し、その変化の機構や進展については、物理的、化学的、力学的、鉱物学的観点から解析が試みられている<sup>1-2)</sup>。しかし経年変化の動きは複雑でかつきわめて遅いため十分な理解ができていない。そこで、凝灰岩を対象に蛍光法を利用した顕微鏡観察と画像処理法を用いて経年変化による劣化現象の解析を試みた<sup>3-7)</sup>。

### 6. 2 解析手法

#### 6. 2. 1 試料

供試試料は風化程度の異なる凝灰岩のボーリングコアから採取した。このボーリングは採掘後約400年を経過した坑道より垂直に掘られたものである。風化程度を推察する基礎資料としては、各試料の吸水率、有効間隙率、弾性波速度を測定した。結果は表6-1の通りで、有効間隙率はJIS A1110に基づき測定し、もっとも大きいものは13.8%で小さいものは5.0%である。

#### 6. 2. 2 樹脂の充填と顕微鏡観察

蛍光剤を添加した樹脂の充填にあたっては、2.2.2に述べたような方法でメチルメタアクリレートを試料に浸透させた後に、整形、研磨して試料を作製した。一部の試料については、その後さらにシアノアクリレートを塗布し、再研磨した。顕微鏡観察については、2. 4で述べたように紫外線および可視光で観察した。

### 6. 3 風化機構と間隙の発達

#### 6. 3. 1 風化の進展

風化の進展の基本的な考え方としては、まず機械的風化作用により割れ目ができ、次にその割れ目にしみこんだ水による化学的風化作用などにより周辺が

表6-1 試料の吸水率，有効間隙率，P波伝播速度

試料番号	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	P波伝播速度 (km/s)	試料番号	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	P波伝播速度 (km/s)
4-1N	2.738	6.760		12-1NS	2.982	7.333	
4-2N	2.894	7.056		12-2NS	2.952	7.169	
4-3N	2.934	7.288		12-3NS	3.858	9.115	4.00
4-4S	3.643	8.726	4.30	12-4N	3.025	7.335	
4-5N	5.370	12.381		12-5NS	2.342	5.795	4.77
4-6S	6.109	13.764	4.42	12-6NS	4.196	9.878	4.30
4-7N	3.676	8.855		12-7NS	3.653	8.776	4.19
4-8NS	5.476	12.455	4.18	12-8NS	3.347	8.090	4.00
4-9NS	3.567	8.552	3.85	12-9NS	4.712	10.989	4.00
4-10NS	3.504	8.458	3.34	12-10S			
4-11S	4.240	10.206	4.55	12-11S	3.540	8.565	4.31
4-12R			4.43	12-12NS	2.910	7.106	4.17
4-13R			4.14	12-13NS	3.642	8.718	3.38
4-14RN	5.390	12.388	3.95	12-14R			
4-15R			3.71	12-15R			
4-16R			3.70	12-16R			4.11
4-17R			4.07	12-17R			3.95
4-18RN	5.515	12.702	4.07	12-18R			4.05
5-1NS	2.006	5.020	5.00	12-19R			4.29
5-2N	2.596	6.375		12-20N	4.411	10.354	
5-3NS	3.697	8.805	3.77	12-21N	6.334	14.549	
5-4NS	3.436	8.306	3.13	13-1NS	6.804	15.365	2.91
5-5NS	3.965	9.487	4.35	13-2NS	4.182	9.704	4.30
5-6NS	4.651	10.859	3.92	13-3NS	5.994	13.406	4.18
5-7NS	3.858	9.183	4.04	13-4NS	6.051	13.883	1.55
5-8NS	4.638	10.915	4.29	13-5NS	4.265	10.205	2.21
5-9N	3.076	7.486		13-6NS	6.523	14.831	1.97
5-10NS	4.178	9.868	3.51	13-7N	11.036	22.808	
5-11NS	4.461	10.476	4.76	13-8NS	6.723	15.117	2.46
5-12N	3.087	7.512		13-9NS	5.887	13.627	3.55
5-13S	1.688	4.250	4.80	13-10NS	3.918	3.360	3.65
5-14N	2.056	5.113		13-11NS	5.248	12.128	3.89
				13-12NS	4.698	10.936	3.85

弱くなり、再び機械的風化作用が起こり新しい割れ目が発生し、その割れ目を通してまた周辺に風化が進行するという繰り返しが考えられている<sup>1-2)</sup>。機械的風化作用によりできる割れ目は比較的鮮明な形となるが、化学的風化作用では溶脱作用と風化生成物の形成をともない、多数の間隙ができ、その変化は漸移的である。蛍光法でこの現象を観察すると、割れ目は輝度差の大きい像として現れるが、化学的風化作用を主とした現象は輝度の濃淡が漸移的に変化した像になるものと思われる。たとえば画像の輝度を4段階に分けてカラー表示し、風化程度の異なる試料についてコンター図を描くと図6-1のようになり、割れ目の発展とそれにともなう周辺への風化作用の進展が組合わさりさまざまな現象が観察される。すなわち凝灰岩における風化の進展状況を一般化すると、まず微細な割れ目ができ（図6-1A）、次に微細な割れ目の両側から次第に風化作用が進行し（図6-1B～C）、さらに風化が進むと微細な割れ目は沈積物により充填されるようになる（図6-1D）。また、このような風化作用の最前線を詳細にみると、主に機械的風化作用が起こった時期と化学的風化作用が優先した時期とが繰り返し起こっているところが観察される（図6-2）。たとえば図6-2Bでは、まず割れ目が形成され（①）、次に割れ目の両側から風化作用が進み、間隙ができ、弱くなる。さらに新しい割れ目（②）が形成され、その割れ目を通して風化作用が前進し、再び新しい割れ目の形成（③）を促進させている。

### 6. 3. 2 割れ目の充填

岩石を溶脱した地下水が蒸発によって濃度を増すと、珪酸、炭酸、硫酸塩、水酸化物など種々の形で溶解物質を沈積させるが、これらのなかで鉄（あるいはマンガン）およびアルミニウムの水酸化物がもっとも不溶性で残留し、しばしばラテライトと呼ばれる赤褐色の沈積物を形成する。このラテライトは、風化系列の最終産物とされ、不透水性であるため、ラテライト層ができると深部へ水の供給ができなくなり、深層風化は起こらない。通常は新鮮な岩石とラテライトの間にはさまざまな段階の風化生成物が存在し、カオリナイトやハイドロゲータイトが中間生成物としてよく認められる。気候条件、とくに温度によって中間生成物がラテライトまで変化せずそのままの状態で止まってしまうことも多い。

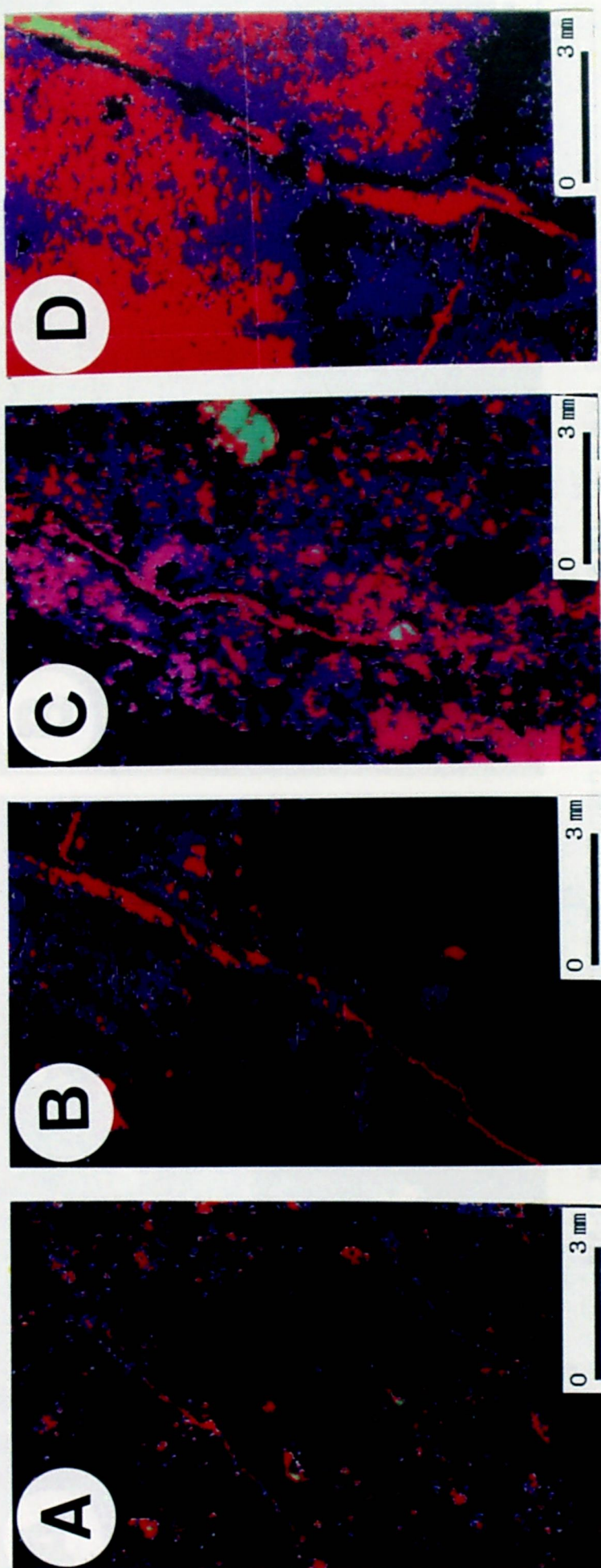


図6-1 凝灰岩における風化の進展



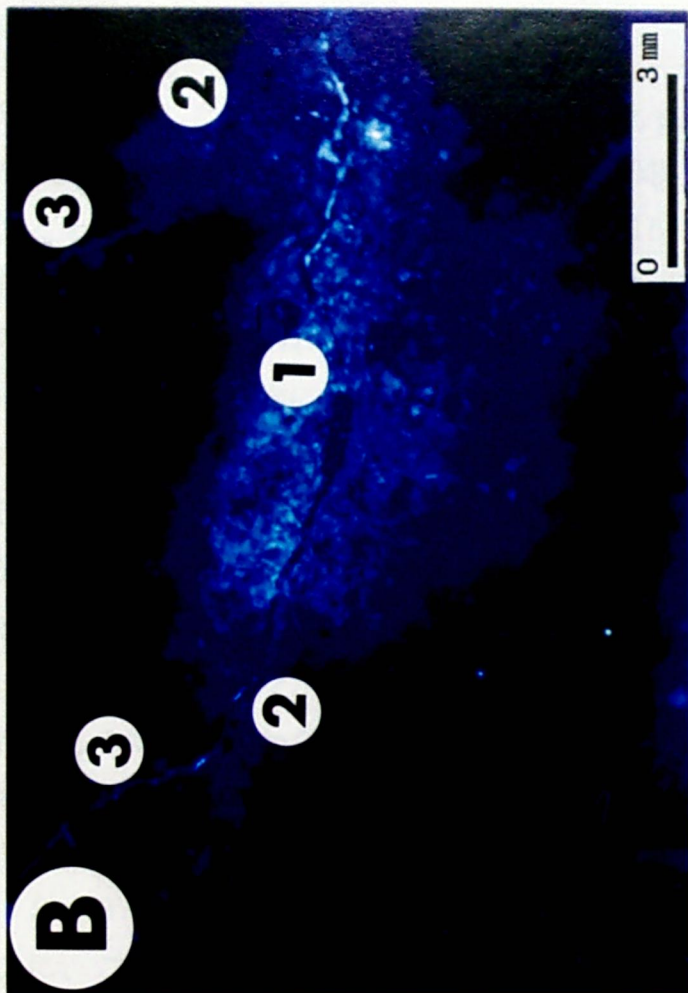
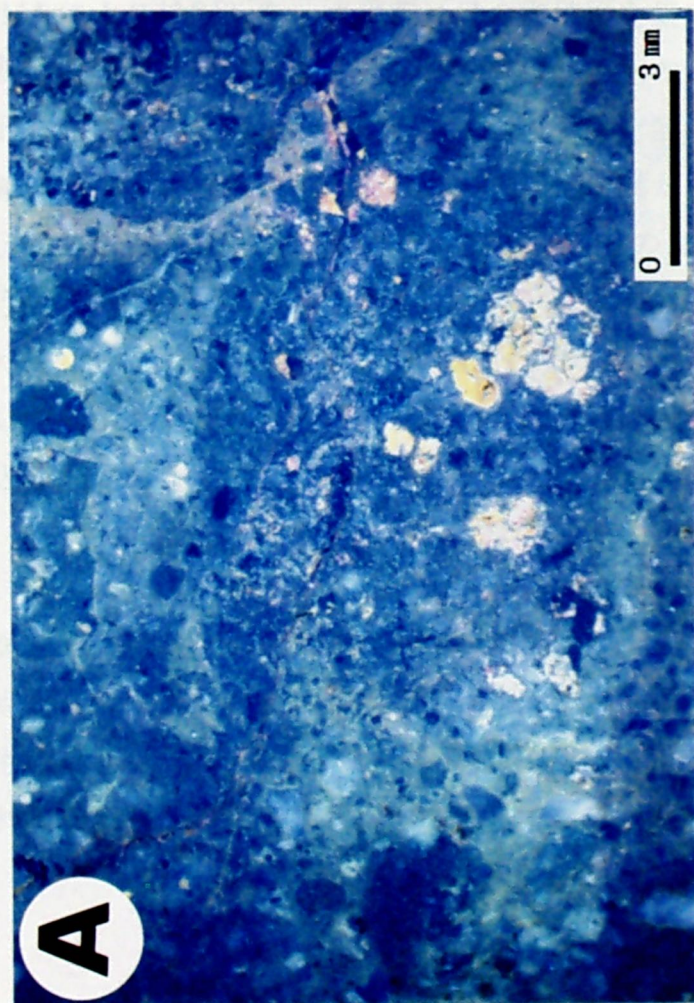


図6-2 機械的風化作用と化学的風化作用の繰り返しにより進展する風化 (A:可視光, B:紫外線)



研究対象とした凝灰岩では、このような風化生成物は、もっとも風化のすすんだ割れ目の充填物としてみられる。これは可視光による像と紫外線を照射した像とを比較すると明らかになる。たとえば図6-3A, Bでは、可視光でみると微細な割れ目に薄い褐色をした充填物が沈積しているのが観察されているが、紫外線を照射すると割れ目の部分に樹脂はほとんど浸透しておらず、割れ目はほぼ完全に風化生成物により充填されている。図6-3C, Dの試料では、可視光では図6-3Aとあまり変わらないが紫外線を照射すると割れ目は完全には充填されておらず、一部地下水の通路として残されているのがわかる。しかしながら充填物で埋められる割れ目の大きさには限界があり、一定の幅以上に大きくなると、完全には充填されていないと考えられる。この現象を観察するための適切な試料は得られなかったが、風化がきわめて進んだ状況にあると思われる試料であるにもかかわらず、完全に割れ目を埋めるには至っていないものが一部観察され、この割れ目の幅は約2 mmであった。

### 6. 3. 3 充填物質

次に、このような充填物が、どのような物質であるかX線回折分析およびEPMAにより検討した。まず割れ目の充填物を集め分析すると、通常充填物はX線回折分析からは非晶質物質と推察されるものが多く、母岩から混入したと思われる石英、長石、緑泥石を除くとほとんど回折線は残らない。しかし稀には結晶性のよい充填物もみられる。割れ目を満たしていた黒色物質、白色の物質、母岩の変質部を分けて分析すると図6-4のようになり、ゲータイトや石こうが同定されている。さらに、これらの充填物の構成元素をEPMAにより調べると、FeあるいはMnが検出される(図6-5)。なお、X線回折分析において石膏が同定されたのは、この岩には黄鉄鉱が含まれていることに起因すると推測される。

### 6. 3. 4 碎屑物

試料中には種々の碎屑物が含まれているが、この碎屑物は樹脂の浸透という観点からは、きわめてよく樹脂が浸透する間隙の多いものとほとんど浸透しないもの2種類にわかれる(図6-7)。また試料全般をみると碎屑物が多数含まれているところには割れ目が発達している傾向がみられる。

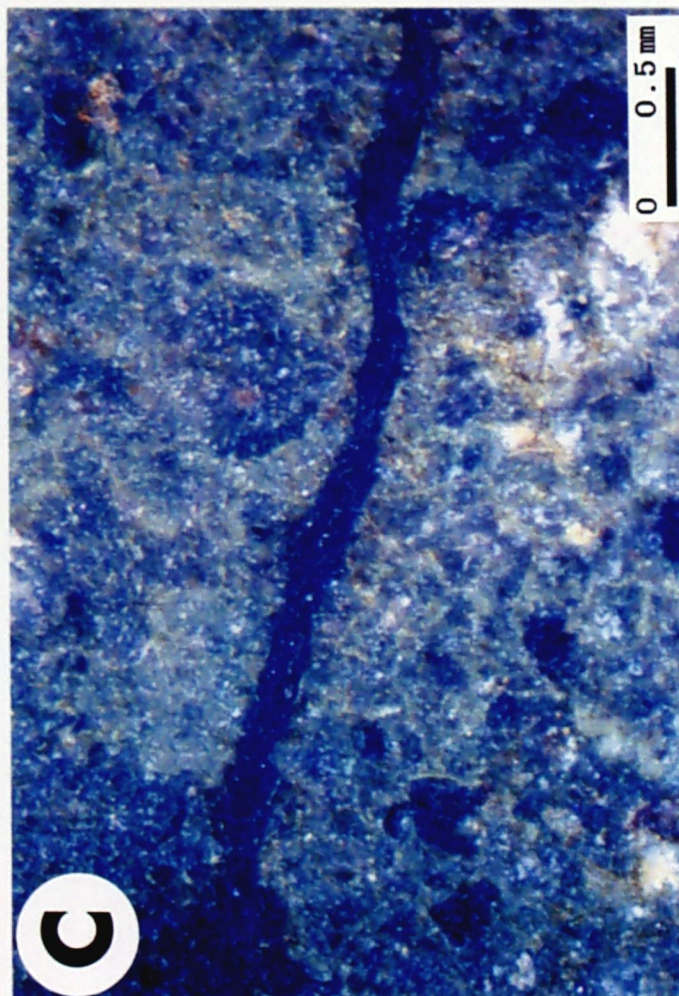
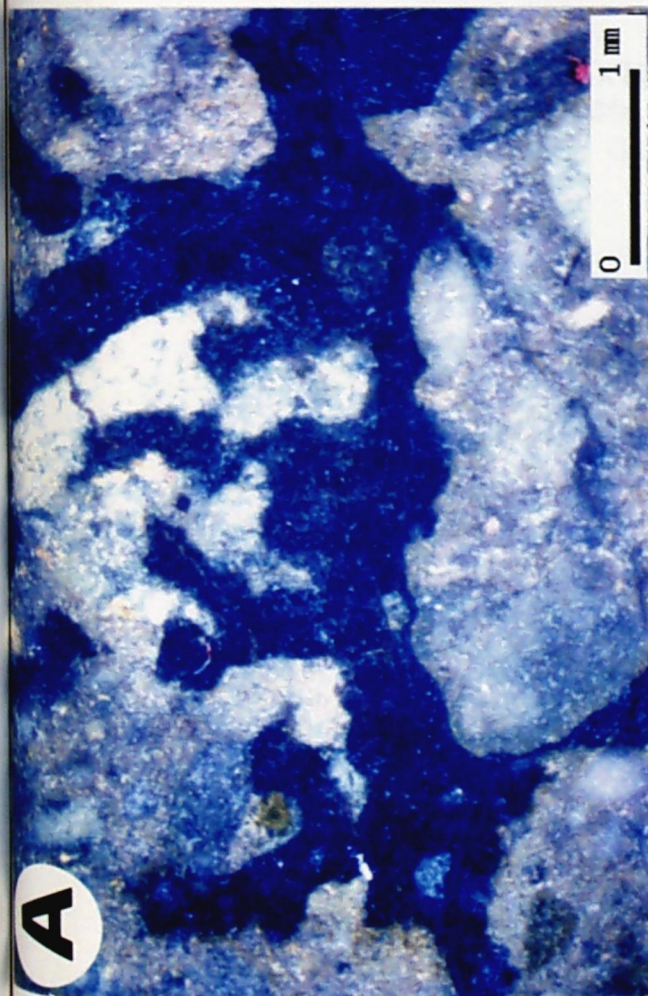
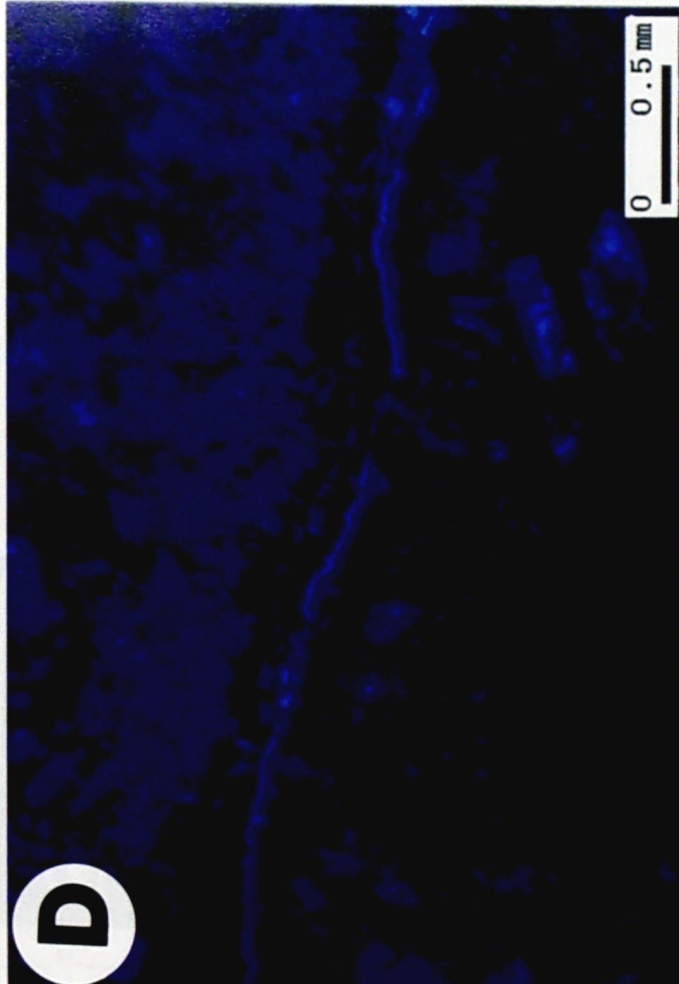
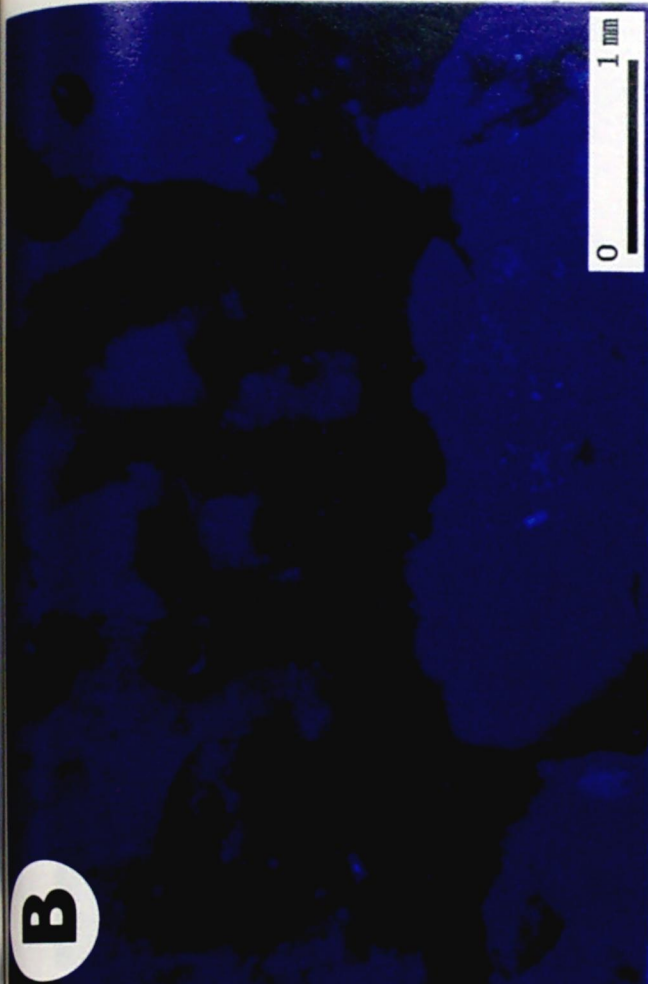


図6-3 割れ目に沈積した充填物  
 A,B: 充填された微細な割れ目 (A: 可視光, B: 紫外線)  
 C,D: 微細な割れ目の中に残されている間隙 (C: 可視光, D: 紫外線)



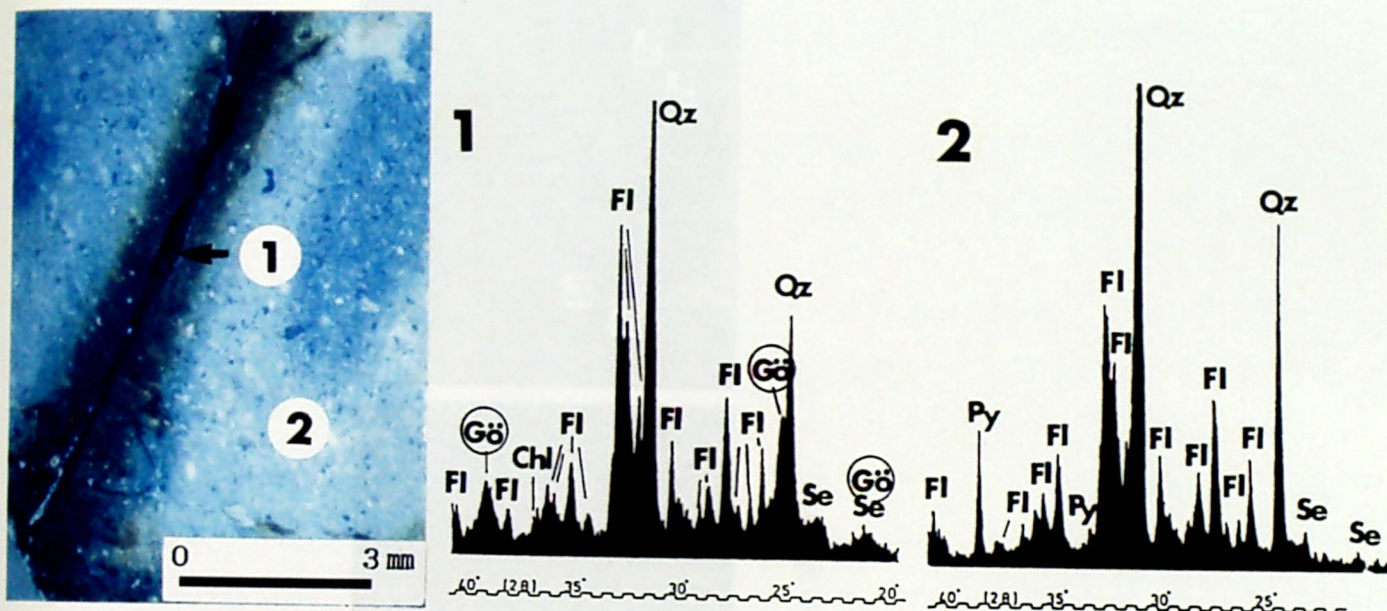


図6-4 割れ目の充填物のX線回折分析 (CoK $\alpha$ )

①光沢のない赤色充填物，②灰色の未変質部

Qz：石英，FI：長石，Chl：緑泥石，Se：絹雲母，Go：針鉄鉱，Py：黄鉄鉱

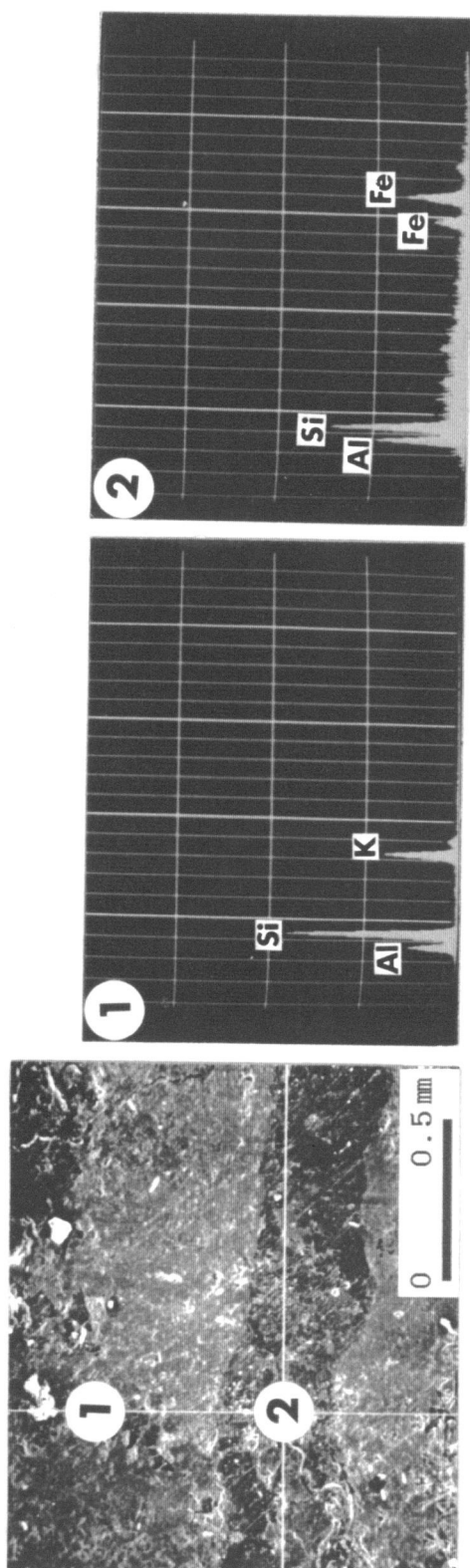


図6-5 EPMAによる充填物の定性分析

## 6. 4 凝灰岩の劣化状況の評価

岩石の劣化状況を把握するために有効間隙率、吸水率、P波伝播速度は有効な方法と考えられている。また、一般に岩石においては吸水率やP波伝播速度と一軸圧縮強度との間には密接な関連があることが報告されている（図 4-4 および図 6-6）<sup>8-9)</sup>。そこで、これらと関連させて、蛍光法と画像処理を組み合わせた評価法を検討した。

蛍光法では、試料の間隙の量は浸透した樹脂の量、すなわち画像の輝度の濃淡で置き換えられる。したがって、輝度の変化状況を段階的に区分し、カラーコンターマップにより表現した。

まず間隙の分布状況をみると、間隙はきわめて不規則な分布をしており、全体を把握するためにはある程度広い面積における間隙の存在状況を解析する必要がある。図 6-7 では 5cm × 5cm の面積を分析したもので、これは 1cm × 1cm の画像を 25 枚張り合わせ作成したものである。このような画像を数枚作成したところ、すでに述べたような風化の進行状況がよく把握され、間隙のもっとも高い部分（緑で表示したもの）はほとんど碎屑物の中に存在し、碎屑物には間隙のきわめて多いものとほとんど間隙の発達していないものと 2 種類あることが判明した。

次に、このようにして得られた 4 段階の間隙率と吸水率、有効間隙率、P波伝播速度との関係を比較した。その結果、輝度の大きい部分（しきい値 79 ~ 255）を除くと、吸水率、有効間隙率では弱い正の相関性が、P波伝播速度では弱い負の相関性を認めることができる（図 6-8）。しかしながら、JIS A1110 により求められる有効間隙率は水が間隙に浸透した量をもとに算出されており、間隙の分布状況とは関係なく、試料全体を平均した値となっている。したがって、この有効間隙率は蛍光法においては樹脂の浸透した量すなわち試料全体の輝度にもっともよく対応するものものと考えられる。そこで種々の試料から 32 地点を選び、紫外線の照射条件および画像入力条件を同一にし、3cm × 3cm の面積における平均輝度を測定し、吸水率、有効間隙率およびP波伝播速度と比較した（図 6-9）。結果はそれぞれ前に示した図 6-8 よりも顕著な相関性を認めることができる。しかし、まだこれらにはかなりのバラツキが存在する。



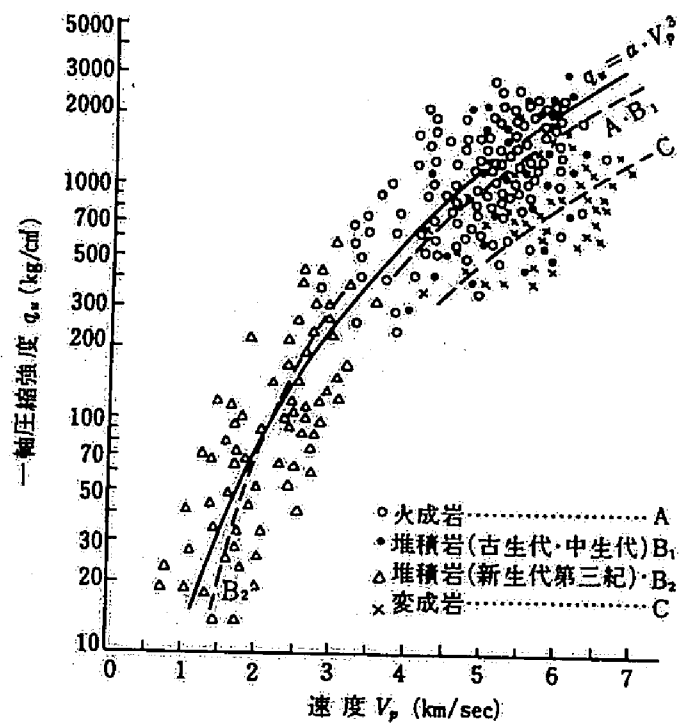


図6-6 P波伝播速度 $V_p$ と一軸圧縮強度 $q_u$ との関係(大久保・寺崎(1971))<sup>9)</sup>

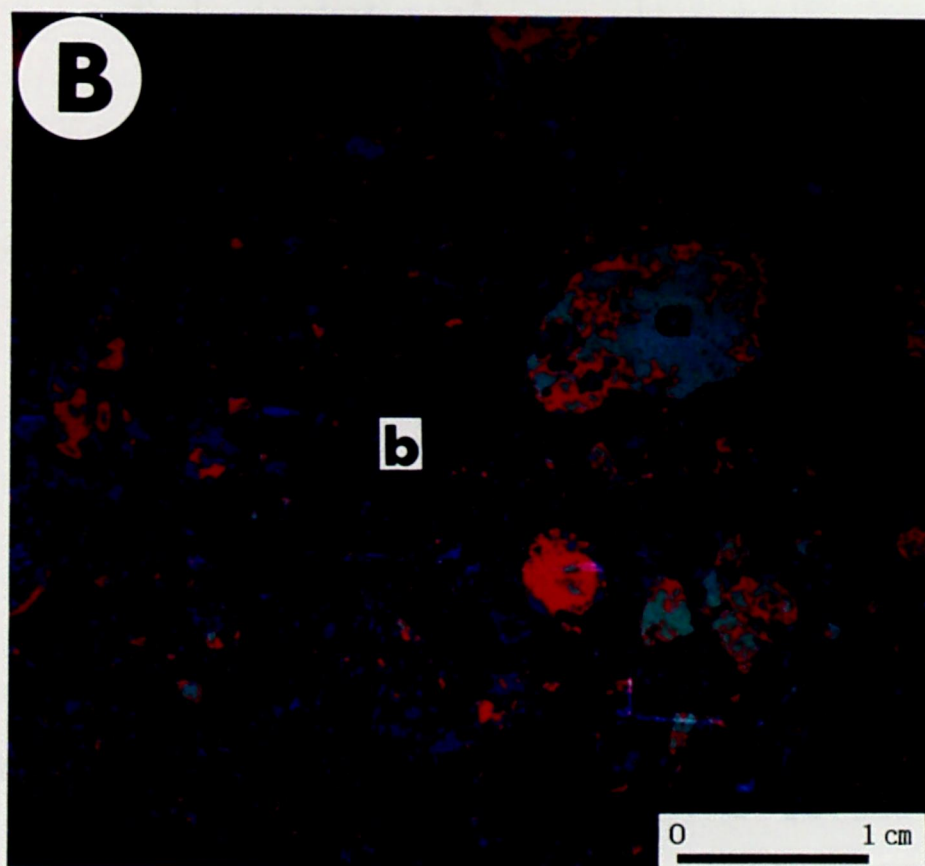
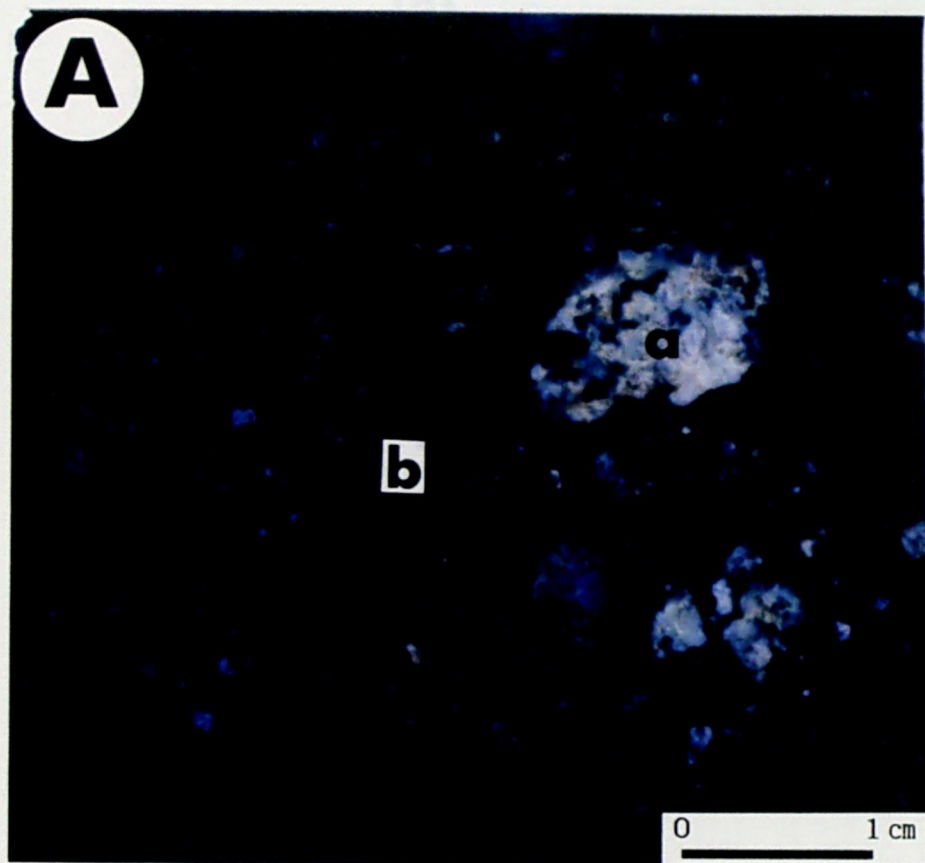


図6-7 試料の顕微鏡写真と間隙の分布

a: 間隙の多い碎屑物, b: 間隙の少ない碎屑物

(黒: しきい値0~15, 紫: しきい値16~31, 赤: しきい値32~79, 緑: しきい値80~255)

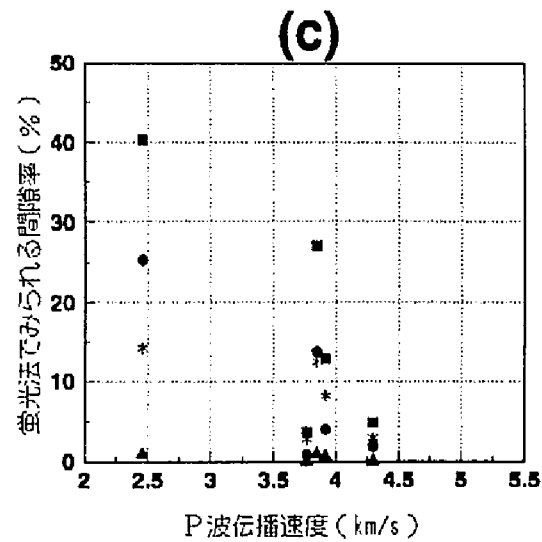
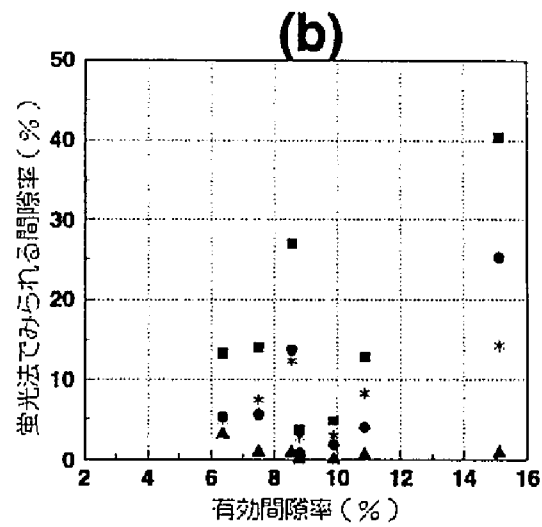
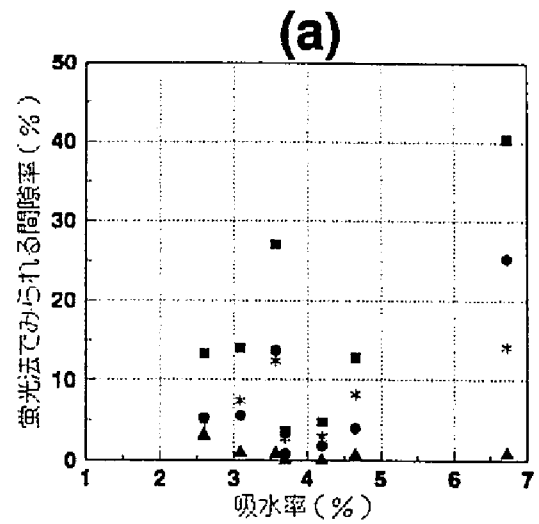


図6-8 蛍光法でみられる間隙率と吸水率、有効間隙率およびP波伝播速度との関係  
 (\*: しきい値0~15, ●: しきい値16~31, ▲: しきい値32~79, ■: しきい値16~255)

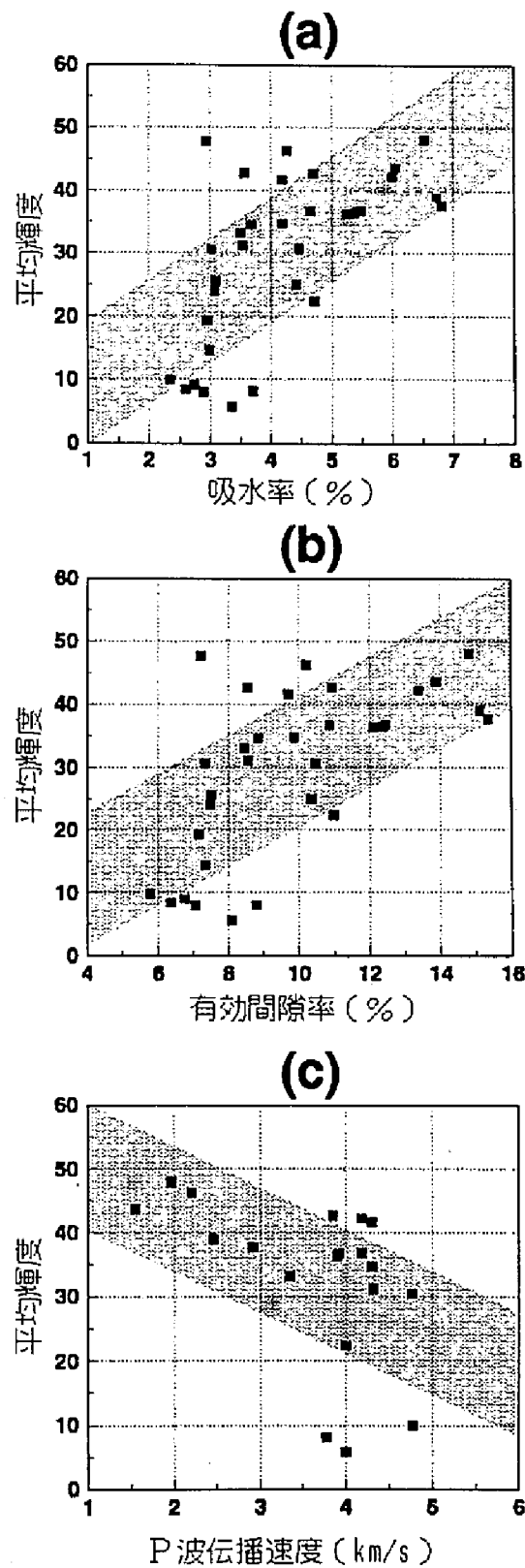


図6-9 3 cm×3 cmの面積における平均輝度と吸水率(a)，有効間隙率(b)およびP波伝播速度(c)との関係

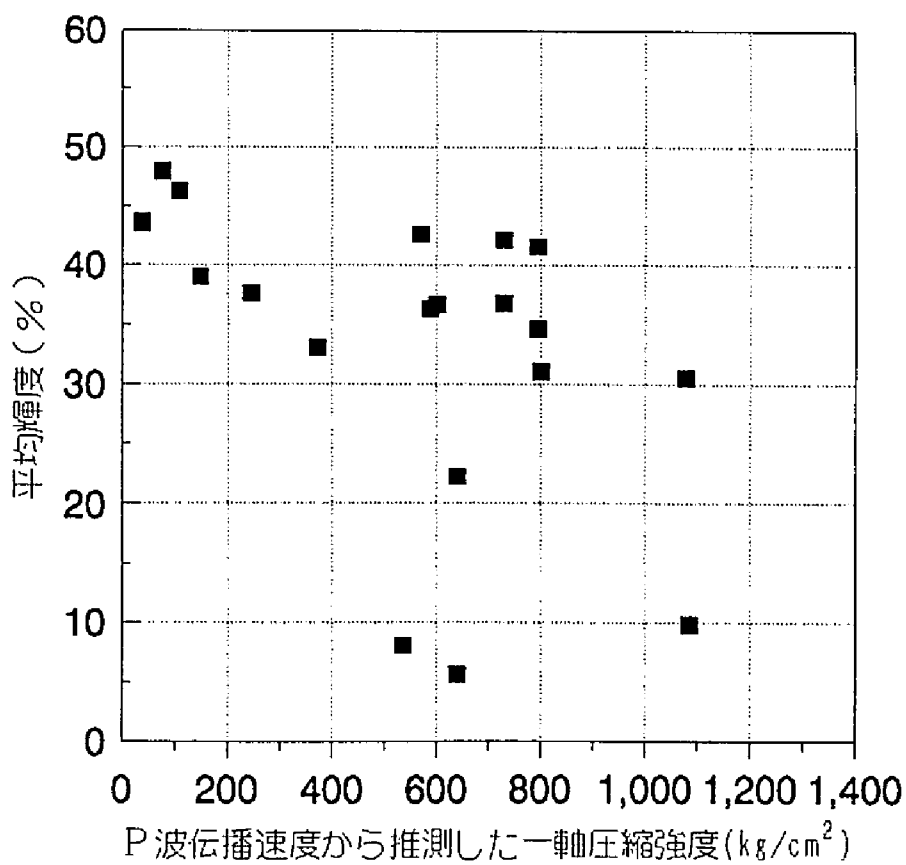
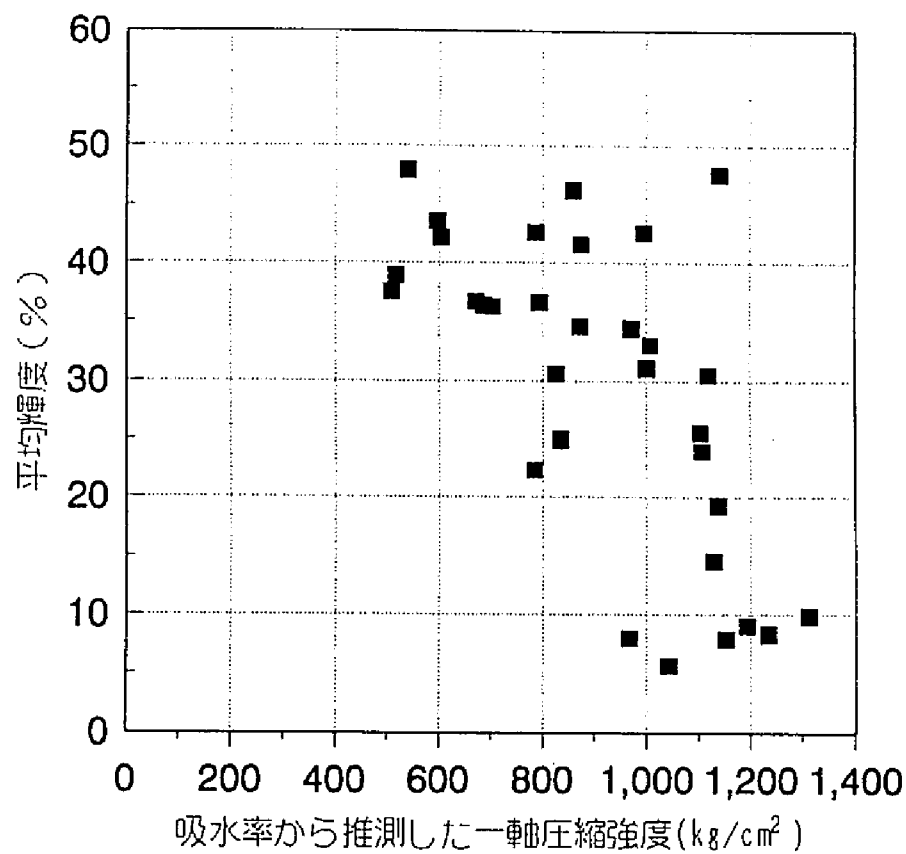


図8-10 3 cm×3 cmの面積における平均輝度と吸水率あるいはP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度との関係



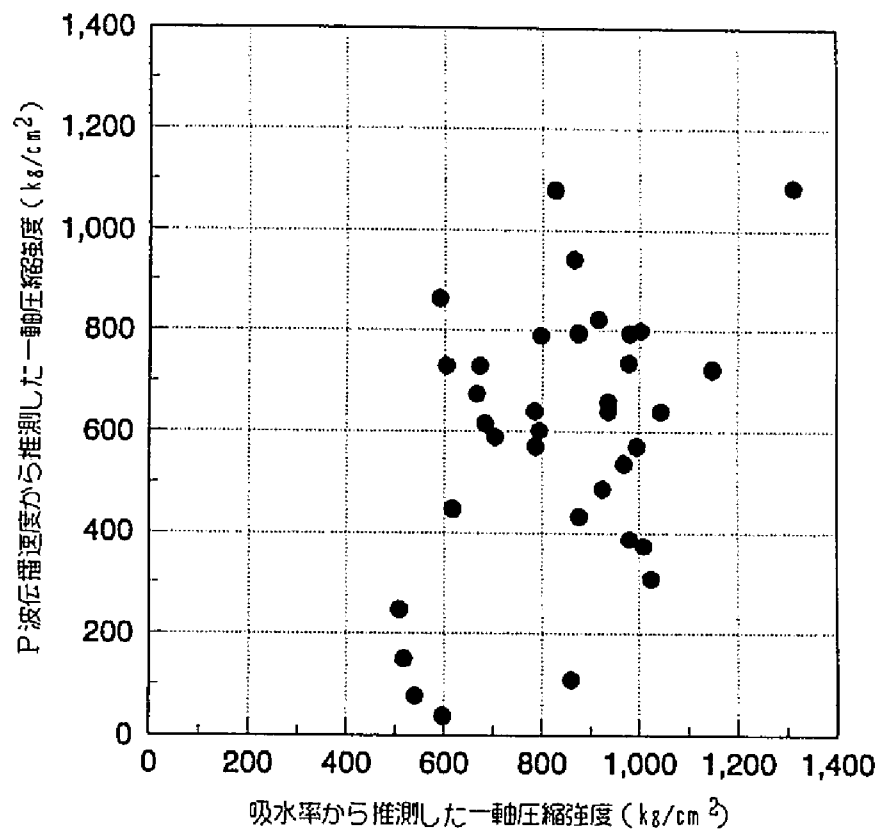


図6-11 吸水率から推測した一軸圧縮強度とP波伝播速度から推測した一軸圧縮強度との関係

最後に、吸水率あるいはP波伝播速度から推定される一軸圧縮強度と蛍光法で求められる平均輝度値との関係について考察した。その結果、平均輝度値は吸水率から推測される一軸圧縮強度とP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度のいずれとも弱い負の相関関係が認められる(図6-10)。しかしながら、吸水率あるいはP波伝播速度から推測される2つの一軸圧縮強度の値には大きな違いが認められ、吸水率から推定される一軸圧縮強度の値の方がP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度よりも大きな値を示している(図6-11)。

これらのバラツキを示す理由としては、間隙が著しく不規則に分布しておりその偏在性に比べて測定面積が小さすぎることで、および蛍光法に用いた試料と有効間隙率を測定した試料が完全には一致していないことなどが考えられる。

## 6. 5 結言

凝灰岩の経年変化について考察した結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) 凝灰岩の風化はおもに機械的風化作用による割れ目の形成とおもに化学的風化作用による漸移的風化作用の繰り返しにより進行しており、その過程が蛍光法により鮮明に把握された。
- 2) 風化現象が進展すると、形成された割れ目に種々の溶解物質が沈積し割れ目が充填される。この風化生成物の形成と充填は可視光による像と紫外線照射による像とを比較することによって初めて明らかになった。
- 3) 凝灰岩に形成されている間隙の分布はきわめて不規則で、砕屑物には間隙を多量に含んでいるものとほとんど間隙の認められないものが認められた。
- 4) 画像処理により3cm×3cmの範囲について求めた輝度と吸水率、有効間隙率、P波伝播速度および吸水率あるいはP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度との間にはよい相関性が認められ、風化の指標として利用できると思われる。

## 参考文献

- 1) Steven M. C. and David P. D. : Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals, Academic Press, INC., (1986)
- 2) Carroll D.: Rock Weathering, Plenum Press, New York-London, (1970)

- 3) 西山 孝・楠田 啓・斎藤敏明：蛍光法による風化岩石の割れ目の観察と評価，資源・素材学会 1991 年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集，307-308, (1991)
- 4) 西山 孝・楠田 啓・斎藤敏明：凝灰岩における風化作用と間隙の進展，資源・素材学会 1992 年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集，323-324, (1992)
- 5) 西山 孝・楠田 啓・斎藤敏明：蛍光法による岩石中の間隙の観察と評価に関する二、三の考察，応用地質，33[1], 17-22, (1992)
- 6) 西山 孝・楠田 啓：凝灰岩の風化に伴う微小割れ目の形成と間隙の発達，日本応用地質学会平成 4 年度講演論文集，61-64, (1992)
- 7) 西山 孝・楠田 啓：凝灰岩の風化プロセスと評価，資源地質，44[1], 25-31, (1994)
- 8) 菊地宏吉：地質工学概論，土木工学社，(1990)
- 9) 大久保彪・寺崎 晃：岩石の物理的性質と弾性波速度，土質工学科誌，19[7], 31-38, (1971)

## 第7章 コンクリートの経年変化による間隙 および割れ目の可視化と評価

### 7. 1 緒言

コンクリートは経年変化によって、強度が低下することはよく知られている。その劣化の状況は圧縮強度の低下、弾性波速度の減衰、中性化などにより計測されているが、劣化機構の解明や評価には種々の問題が残されている。これまでの研究では肉眼で識別しうる程度の割れ目については多くの記載があるが、顕微鏡下ではじめて認められるような微細な割れ目についてはほとんど報告がない。この理由は微細な割れ目の識別が顕微鏡下では容易でないことと、試料作製の時にできる二次割れ目と初成割れ目との区別が困難なことがあげられている。そこで経年変化したコンクリートについてまず蛍光法により微細な割れ目を視覚化し、観察した。次に画像処理法を用いて微細な割れ目の抽出と定量化を試みた<sup>1)~3)</sup>。

### 7. 2 試料の作製と顕微鏡観察

浸透性に優れた樹脂としては、シアノアクリレートとメチルメタアクリレートの2種を用いたが、コンクリートの微細な割れ目の観察にはシアノアクリレートの方がメチルメタアクリレートより適している<sup>4)~5)</sup>。その理由はメチルメタアクリレートでは割れ目とともに吸水率の高いセメントペーストの部分全面に樹脂が浸透し発光するので、割れ目とセメントペーストとの差が顕著でなくなるのに対し、シアノアクリレートではメチルメタアクリレートより浸透力が弱く、割れ目には浸透するがセメントペースト中の間隙へはほとんど浸透しないので、割れ目の識別が容易になるからである。シアノアクリレートの充填方法は、2.2.2で述べた通りである。

### 7. 3 コンクリートの経年変化

供試試料としては防波堤やダム建設物として40～50年経過したコンクリートを用いた。まず肉眼で試料の劣化状況を見ると、割れ目は認められず、一

部の粗骨材の周辺に顕著なリムが形成されている程度であった。しかしながら、これらに紫外線を照射して観察すると、モルタル部分や骨材中に種々の微細な割れ目が形成されているのが判明した。代表的な試料の特徴についてみると以下のとおりである。

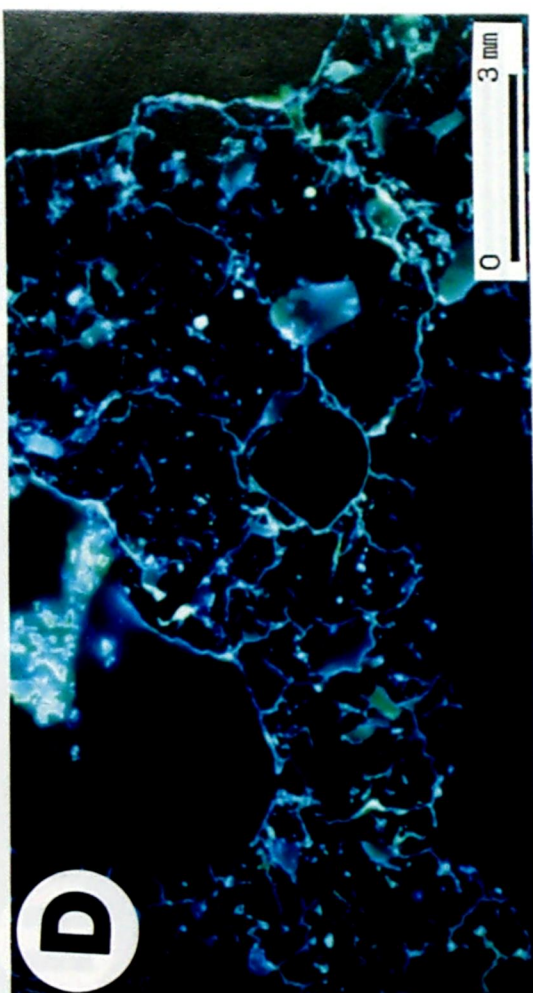
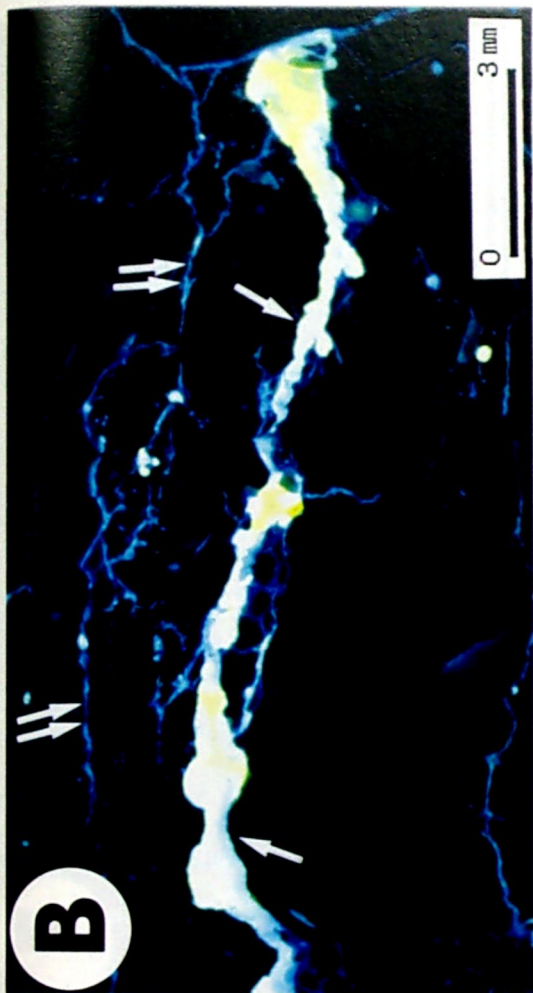
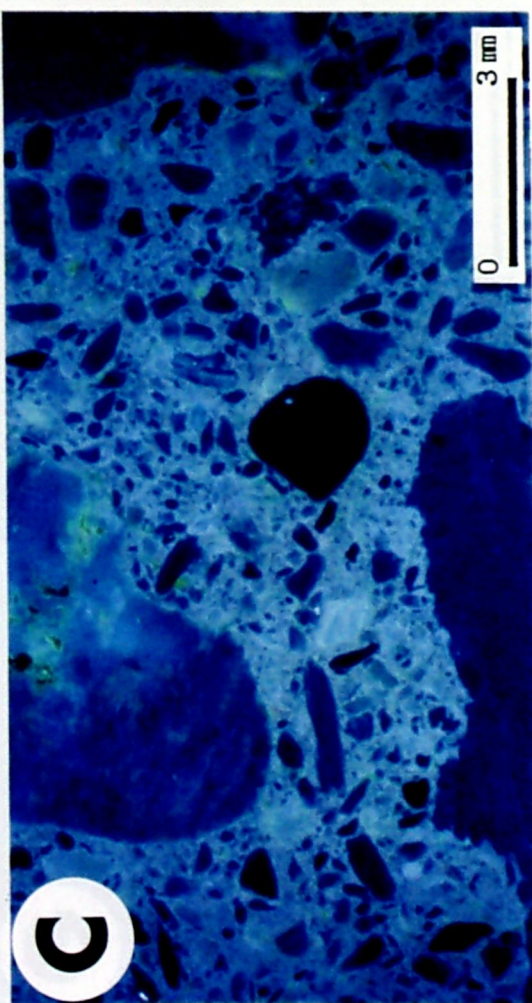
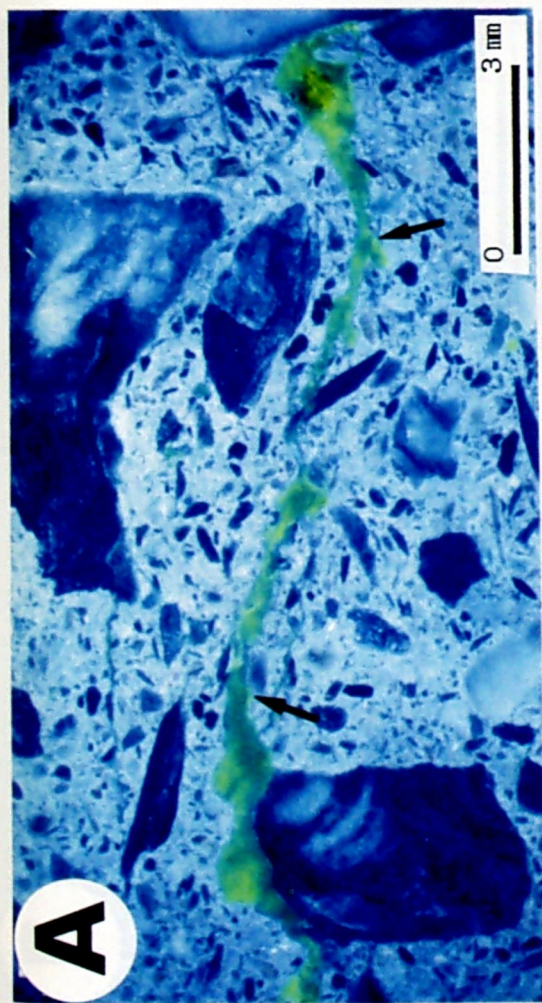
図 7-1A は自然光、図 7-1B は紫外線照射により観察したものである。自然光では一本の割れ目が認められるのみであるが、紫外線でみると大きな割れ目の周辺に多数の平行な微細な割れ目が形成されているのがわかる。図 7-1C, D は経年変化しているコンクリートの内部を観察して最も一般的にみられるもので、モルタル部分に多数の不規則な形状をした間隙と割れ目がみられる。図 7-1E, F は粗骨材における経年変化を観察したもので、周縁部のリムの形成や骨材中の微細な割れ目が紫外線照射により鮮明に認めることができる。また図 7-1G, H はコンクリート打継ぎと思われる部分で、構成粒子の大きさや固結状況の相違から経年変化により形成された割れ目も異なっている。図 7-1I は図 7-1D の一部を拡大したもので、小さな幅の狭い割れ目が次第に連なり連続性のよい割れ目に発展していく様子がうかがえる。図 7-1J は気泡の多い部分に形成されている微細な割れ目である。

## 7. 4 劣化状況の評価

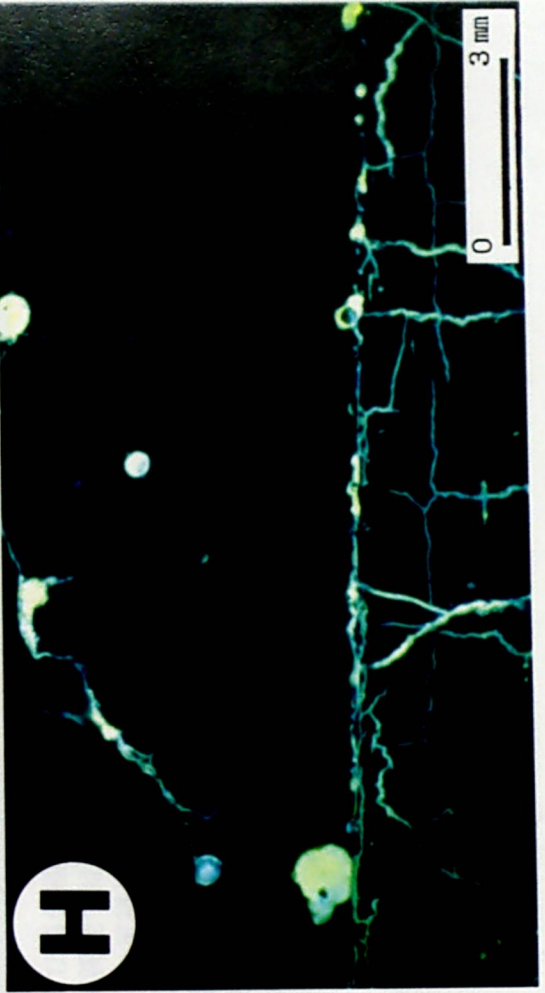
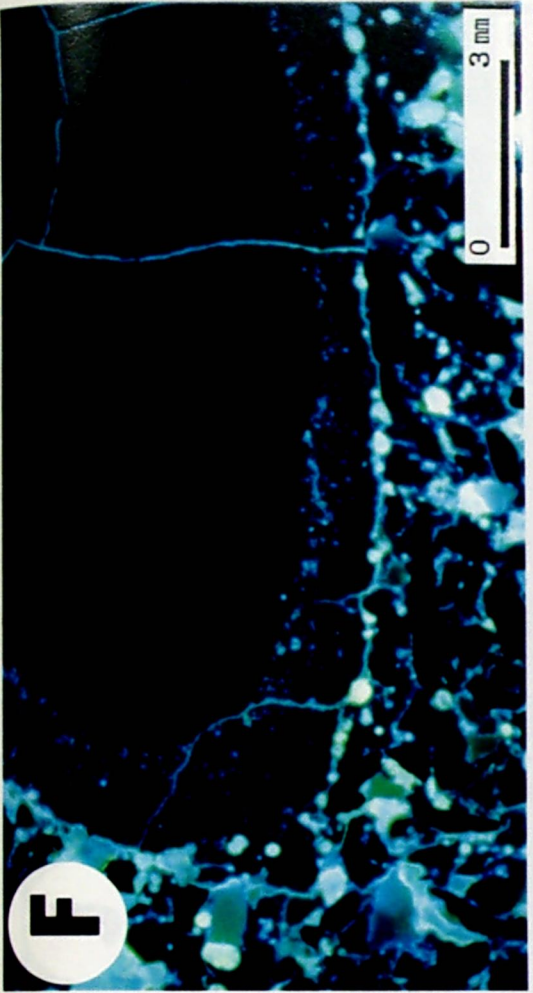
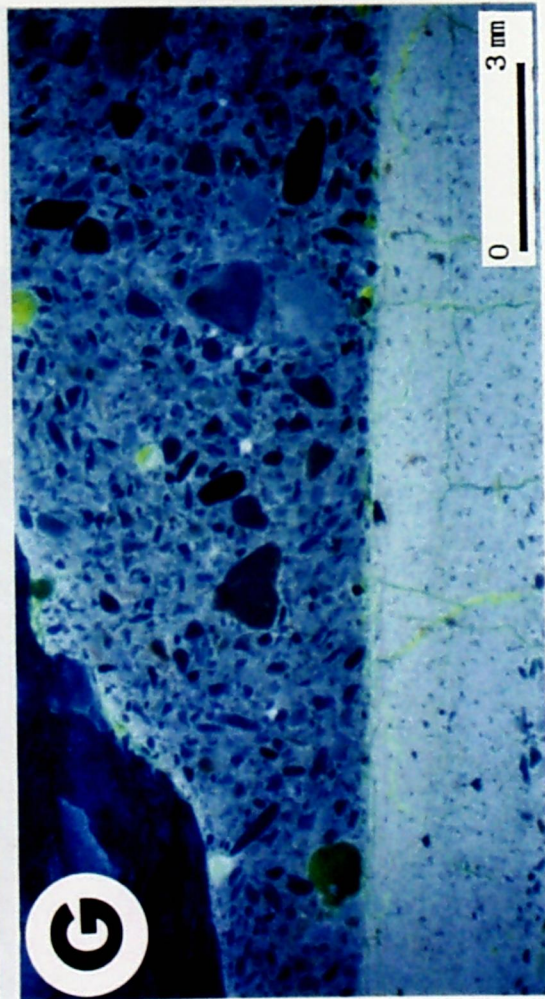
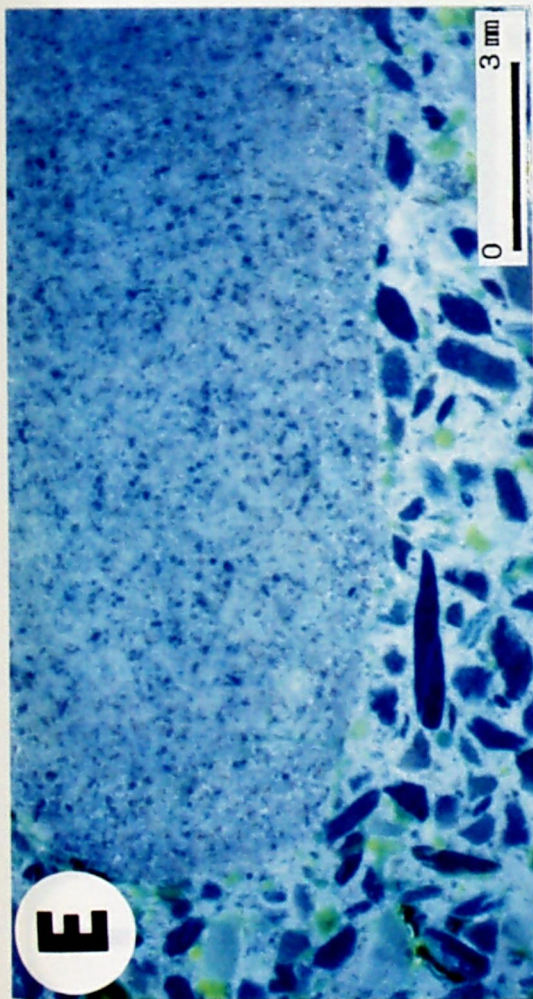
微細な割れ目は時間の経過とともに幅、長さ、数が増加し、コンクリートの劣化を引き起こすものと推察されるので、割れ目の分布状況を定量的にあるいは半定量的に把握すればコンクリート劣化の状況が評価できる。そこで、蛍光法により得られた画像と可視光による画像を処理することによって、まずコンクリート中の気泡、割れ目、モルタル、粗骨材を個々に抽出し、その後モルタル部分に発生している微細な割れ目を定量的に評価する方法について検討した。なお、骨材中にも微細な割れ目やリムが存在するが、それらはコンクリート打設以前に存在していたものか、経年変化によりできたものであるかの判定が困難であるので除外した。

おもな画像処理としては、まず画像強調にラプラシアンオペレータを用いた。この方法の欠点はわずかな輝度の差にも敏感でノイズを生じ易いため<sup>7-9)</sup>、メディアンオペレータによるエッジ保存平滑化が必要である。二次微分オペレータでは割れ目のような線状の物体に対しては強調効果があるのに対して、気泡











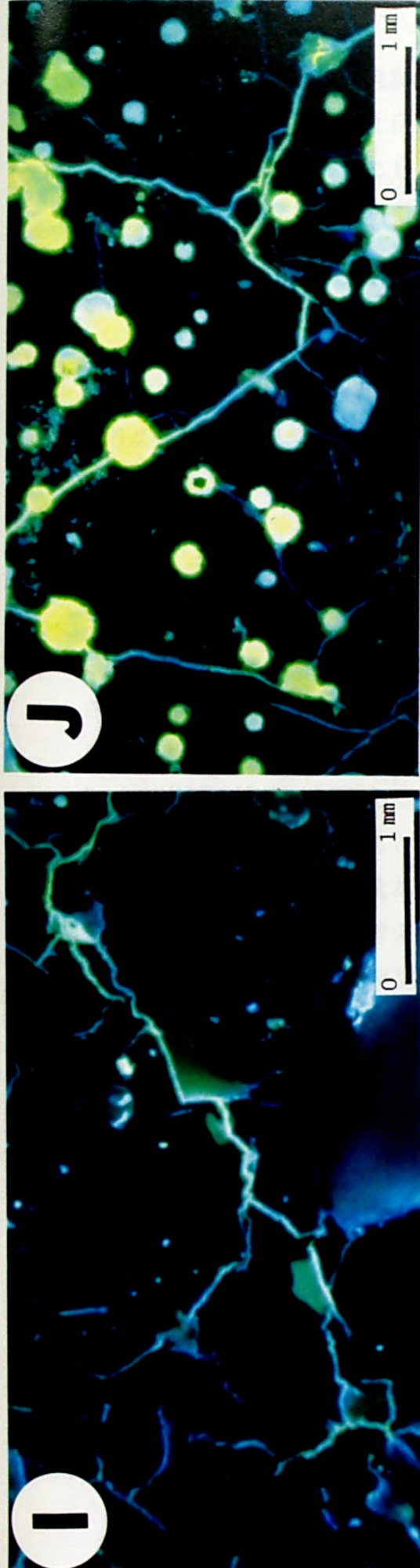


図7-1 40～50年経過したコンクリートの可視光および紫外線による観察

A, B: 可視光で確認される大きな割れ目(↑)と可視光では確認できない割れ目(↑)(A: 可視光, B: 紫外線)

C, D: コンクリート中の一般的な割れ目と間隙 (C: 可視光, D: 紫外線)

E, F: 粗骨材周縁部のリムと骨材内部にみられる割れ目 (E: 自然光, F: 紫外線)

G, H: コンクリート打設時の差に基づく経年変化の相違 (E: 自然光, F: 紫外線)

I: コンクリート中の微細な割れ目を拡大したもの (紫外線)

J: 気泡の多い部分に形成された微細な割れ目 (紫外線)

のような面状の物体には強調効果は少ない。そのため、2値化の際のしきい値を変えることによって割れ目と気泡を区別することが可能となる（図7-3）。しかしながら、このようにして得られた割れ目の2値画像をみると、割れ目が細分化されているところがあるので、画像の連結処理を行い、その後ノイズ除去を行い画像を補正した。さらにこの画像から割れ目の幅は無視し、長さの情報だけを問題とするときには、Hilditchの方法により細線化処理を行った。なお、モルタルと粗骨材の識別には可視光による画像を、気泡や割れ目の識別には紫外線による画像を用いた。割れ目の抽出された画像から一定面積あたりの割れ目の量や長さは画像処理装置に内装されている画像解析計算機能により計測した。なお、割れ目の量および長さは2値画像における割れ目の面積率と長さである。これらの画像処理の主なものをフロー図に示すと図7-2のようになる。なお、これまで経年変化の評価にはしばしばP波伝播速度が用いられている。また、P波伝播速度と一軸圧縮強度との間には密接な関連があることが報告されている<sup>9)</sup>。そこで、P波伝播速度およびP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度と蛍光法より求めた割れ目の量あるいは長さとを比較検討した（表7-1、図7-4、図7-5）。その結果、いずれもよい相関性が認められ、P波伝播速度の減少あるいは一軸圧縮強度の低下とともに、割れ目の量あるいは長さとも減少することが明らかになった。このことから、画像処理によって求められる割れ目の量あるいは長さはコンクリートの強度劣化を評価する有効な指標となるものと考えられる。なお、試料を採取した建物側壁表面におけるシュミットハンマー反発値から推測した一軸圧縮強度は $134\text{kg/cm}^2$ であるのに対して、P波伝播速度から推測される一軸圧縮強度は $78 \sim 145\text{kg/cm}^2$ であり、両者の間には大きな差はみられなかった。

## 7. 5 結言

経年変化したコンクリートを蛍光法により顕微鏡観察し、次に画像処理法を併用した劣化の評価法の検討を試みた。その結果、これまで確認の困難であった経年変化による微細な割れ目が可視化され、分布状況、発展状況が明らかになった。このように経年変化したコンクリートには顕在化した割れ目の他に多数の微細な割れ目が潜在しており、これらはコンクリートの劣化に直接関連しているものと考えられる。また画像処理を用いるとこの微細な割れ目の量や長

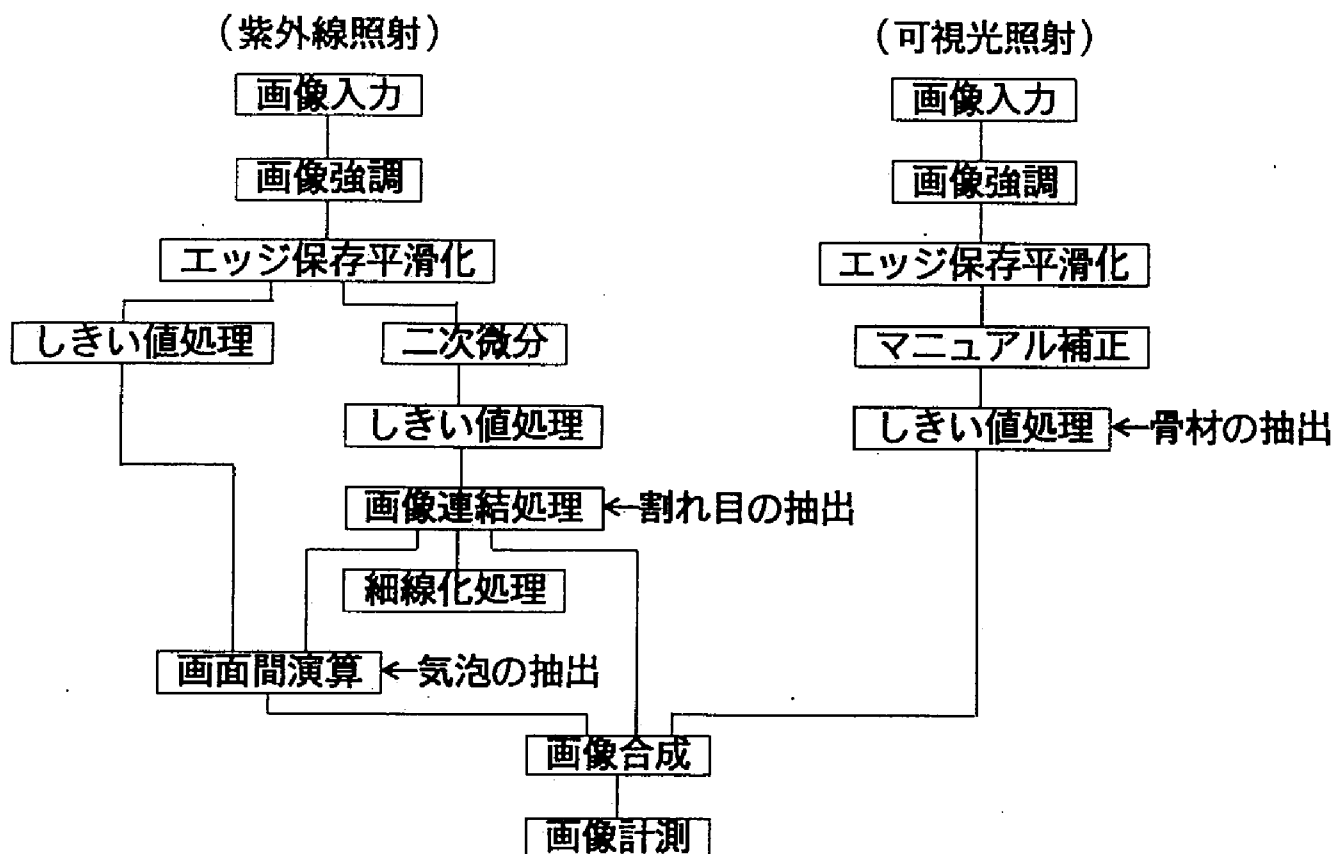


図7-2 経年変化したコンクリートから気泡、割れ目、粗骨材を抽出し解析する画像処理フロー



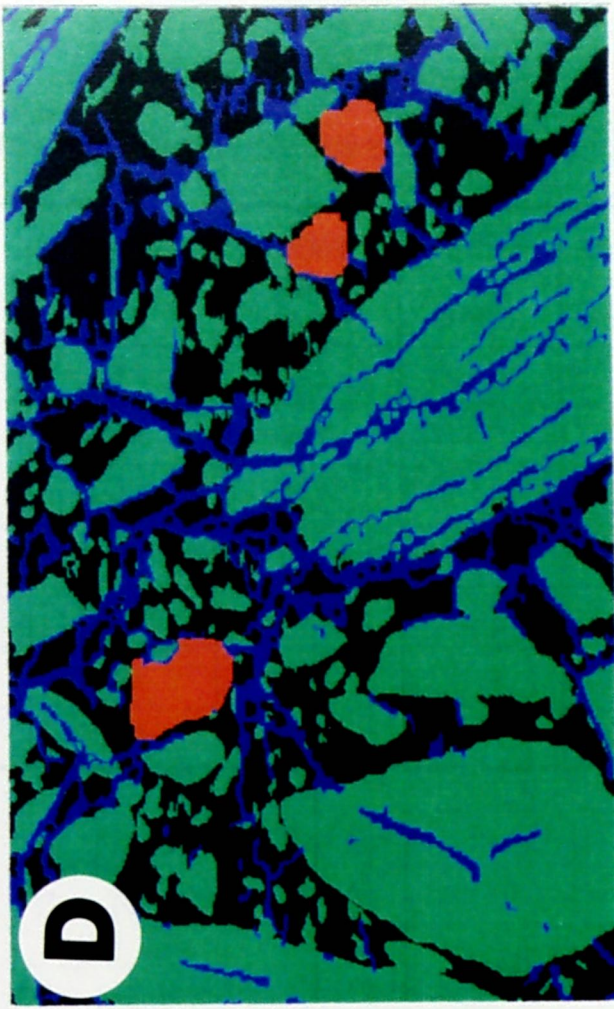
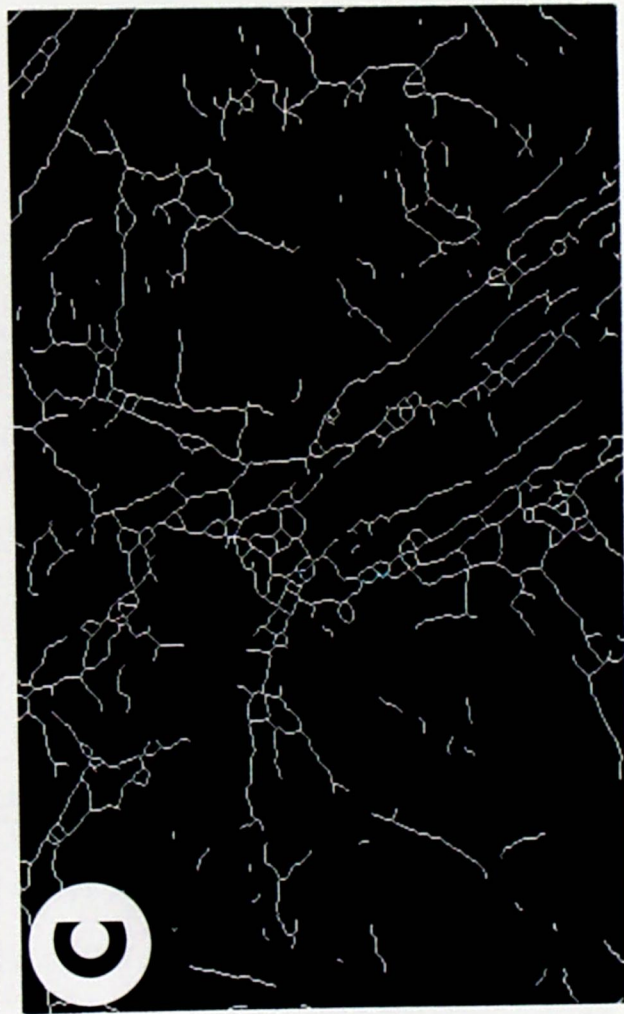
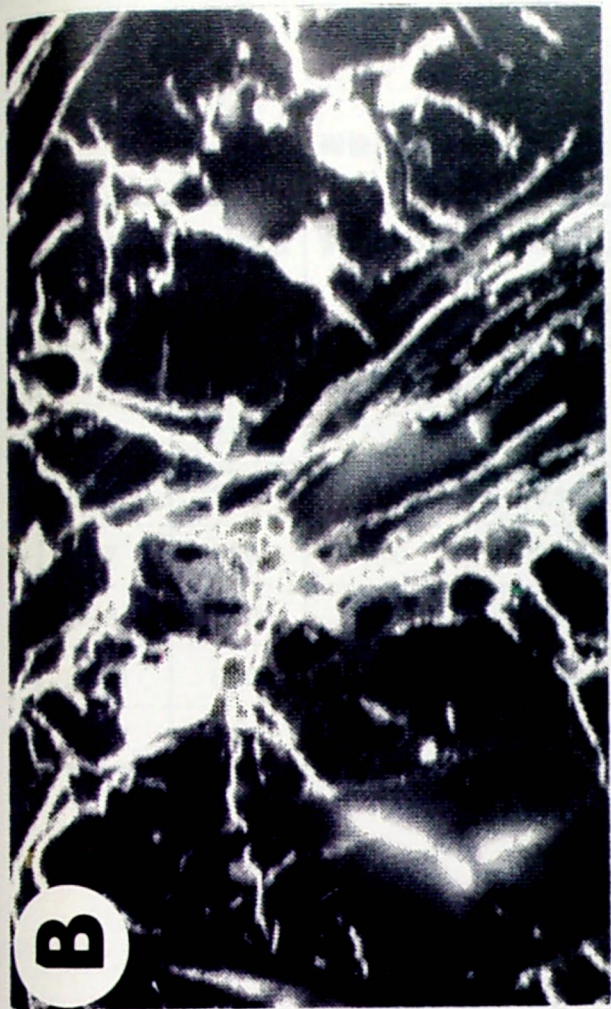
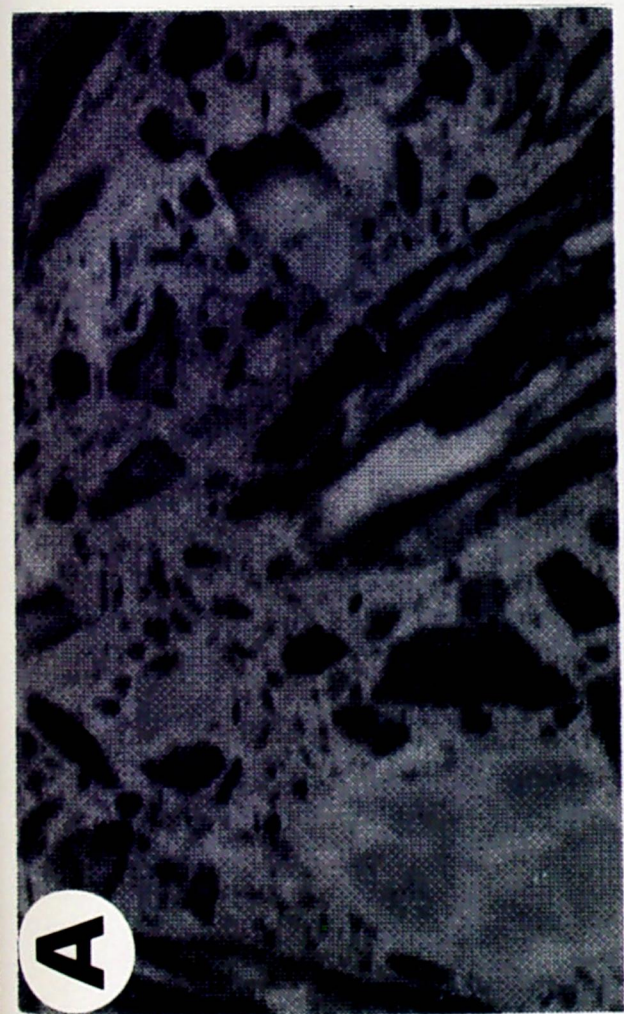


図7-3 画像処理結果

A:可視光による入力画像, B:紫外線による入力画像, C:コンクリート中の割れ目を抽出した細線化画像,  
D:割れ目(紫), 気泡(赤), 粗骨材(緑), モルタル(黒)を色分けした画像)

表 7-1 画像処理によって求めた割れ目の量、長さと物理的指標との関係

試料番号	コア採取 深度 (m)	割れ目の量 (全体) (%)	割れ目長さ (モルタル中) (mm/mm <sup>2</sup> )	P 波伝播速度 (m/s)	一軸圧縮強度 (推測値) (kg/cm <sup>2</sup> )	シュミットハンマー 反発値 (側壁)	表面強度 (側壁) (kg/cm <sup>2</sup> )
B-2	2.00	19.1	0.92	1,986	78.3	24.48	134.2
B-4	2.66	13.7	0.88	2,188	104.7	—	—
B-5	3.70	11.3	0.82	2,313	123.7	—	—
B-7	5.20	16.0	0.94	2,140	98.0	—	—
B-9	6.20	10.7	0.75	2,230	110.9	—	—
B-11	6.60	13.3	0.67	2,436	144.6	—	—
B-12	7.30	7.4	0.58	2,572	170.1	—	—



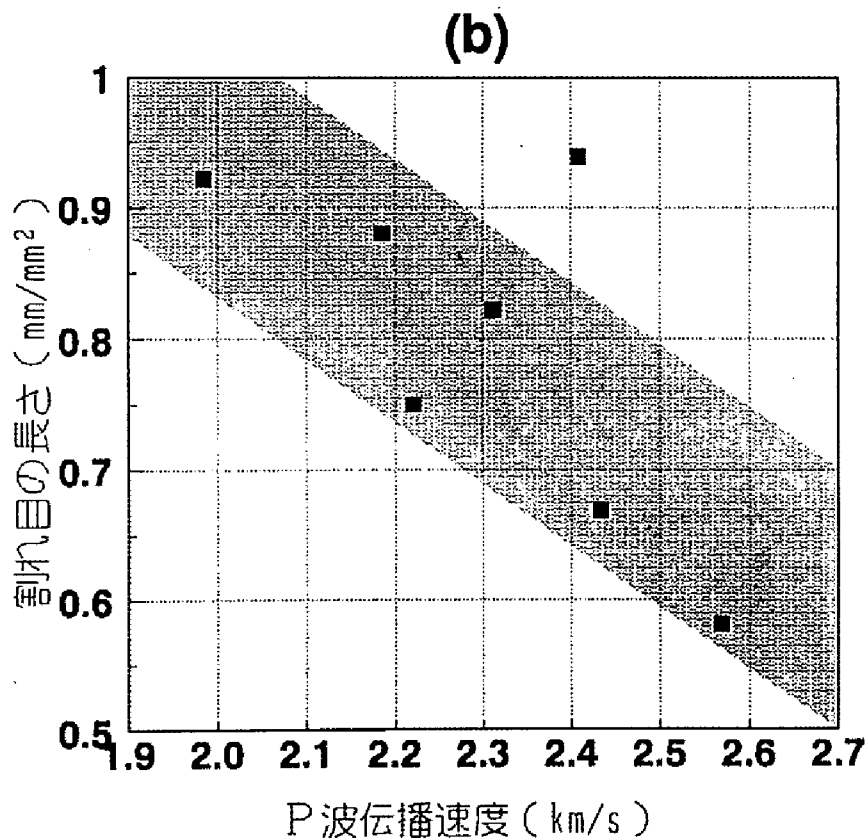
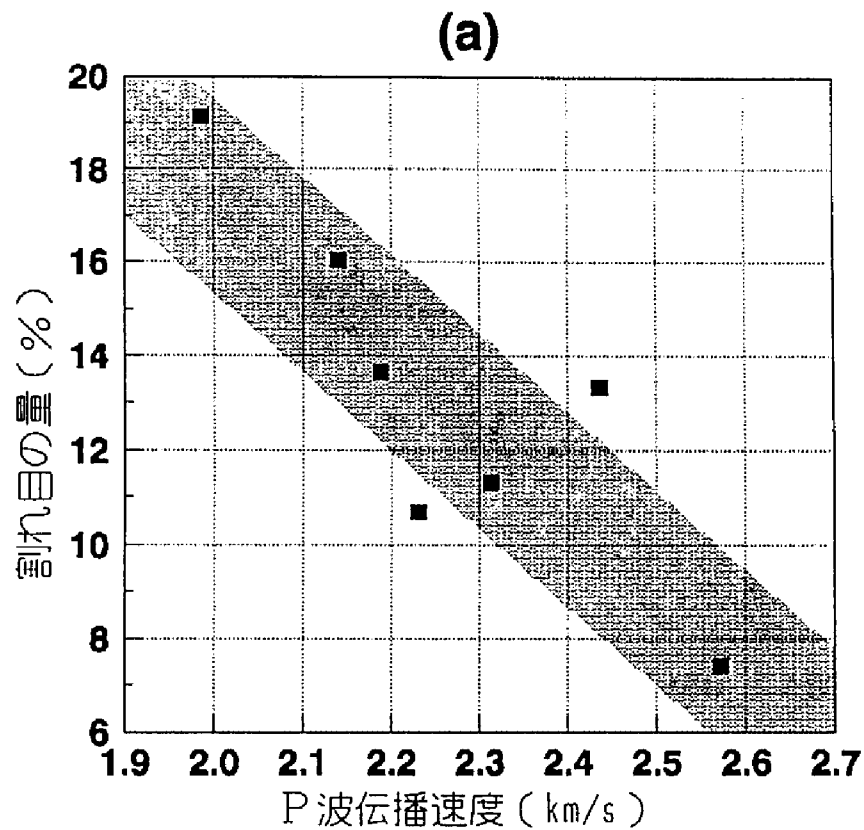


図7-4 画像処理結果とP波伝播速度との関係

- (a) モルタル中の割れ目の量とP波伝播速度との関係
- (b) モルタル中の割れ目長さとP波伝播速度との関係

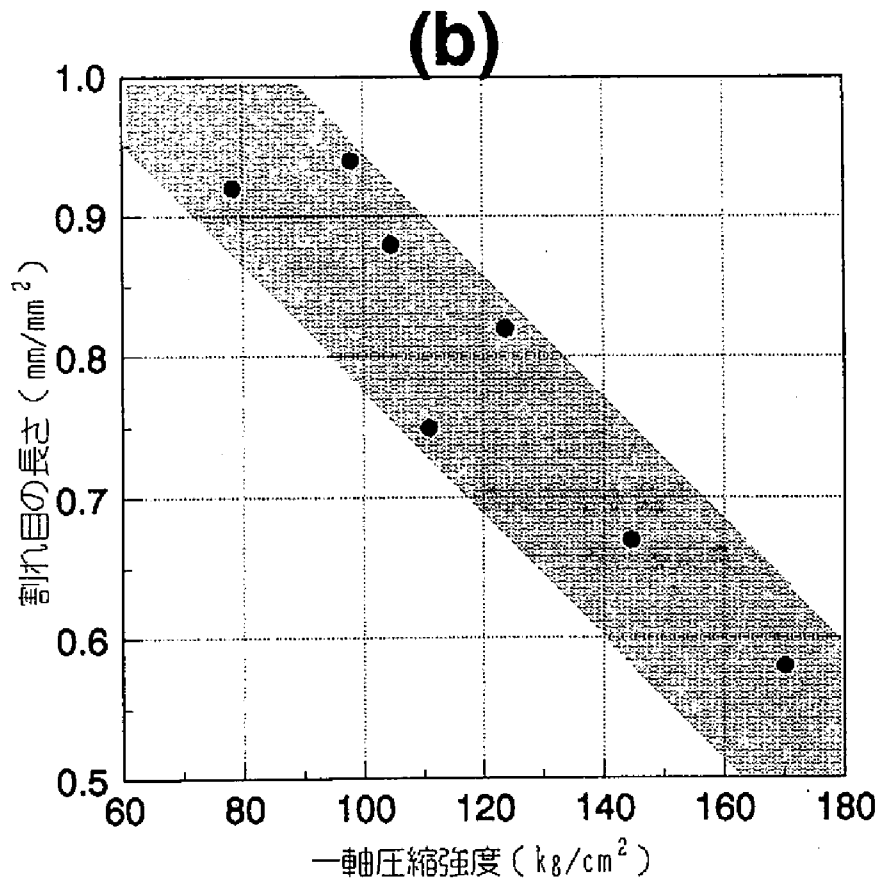
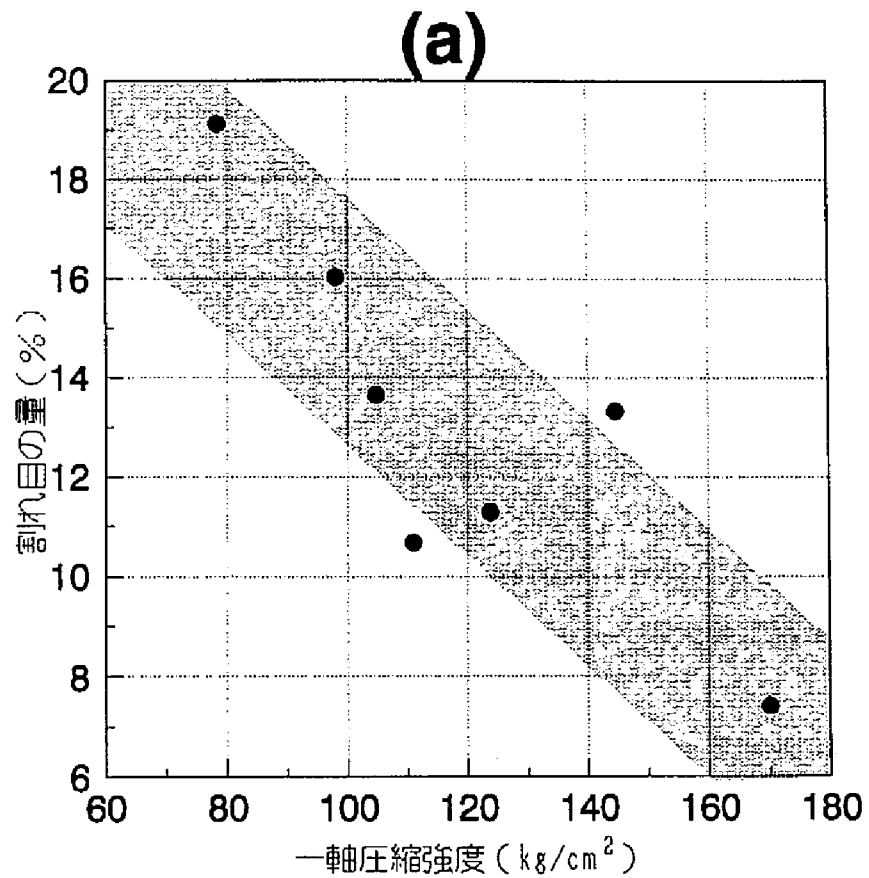


図7-5 画像処理結果とP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度との関係

- (a) モルタル中の割れ目の量と一軸圧縮強度との関係
- (b) モルタル中の割れ目長さと一軸圧縮強度との関係



さが定量的に把握される。今後種々の段階の経年コンクリートについて同様のデータが揃えば、経年変化したコンクリート劣化の定量的評価が可能になるものと思われる。なお、画像処理法により求められた割れ目の量および長さ、P波伝播速度、あるいはP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度との間には、よい相関性が認められた。

## 参考文献

- 1) 西山 孝・楠田 啓・石田淳志・金山清一：蛍光法によるコンクリートの経年変化の観察と評価について，資源と素材，108[7]，521-524，(1992)
- 2) 西山 孝・楠田 啓・金山清一：コンクリートの経年変化によって形成される微細な割れ目について，第46回セメント技術大会講演集，464-467，(1992)
- 3) Nishiyama, T. and Kusuda, H. : Identifications of Pore Spaces and Microcracks Using Fluorescent Resins, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol. 31, No.4, 369-375, (1994)
- 4) 西山 孝・前川慎喜・日下部吉彦・中野欽一：シアノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察，セメント技術年報，Vol.42，65-67，(1988)
- 5) 西山 孝・北川元紀・前川慎喜・楠田 啓・中野欽一：硬化したコンクリートの画像処理による観察，セメント・コンクリート論文集，Vol.43，590-593，(1989)
- 6) 長尾 真：画像認識論，コロナ社，(1982)
- 7) 手塚裕樹・川崎逸郎：SPOT画像による地形分類のためのテクスチャ解析手法 について，日本測量学会学術講演会発表論文集，195-200，(1989)
- 8) 大久保彪・寺崎 晃：岩石の物理的性質と弾性波速度，土質工学会誌，19[7]，31-39，(1971)

## 第8章 アルカリ骨材反応により形成される 間隙および割れ目の可視化とアルカリ 骨材反応性の評価

### 8. 1 緒言

コンクリートが劣化する原因の一つとして、アルカリ骨材反応がとりあげられ、近年大きな問題となってきた<sup>1-2)</sup>。わが国のアルカリ骨材反応による被害例としては、その初期には安山岩を骨材として使用したコンクリートにひび割れが見られ<sup>3)</sup>、その後、チャート質骨材を使用した場合についても被害が報告されるようになってきた<sup>4)</sup>。さらに最近では骨材資源の不足を反映して、種々の新しい材料が骨材として活用され始めており、これら新しい材料のアルカリ骨材反応性の吟味も必要となっている<sup>5-6)</sup>。その一つとして、ニッケル製錬の際に大量に発生し、現在は主に埋立材として用いられているフェロニッケルスラグをコンクリート用骨材資源として利用しようという計画も進められている<sup>7)</sup>。そこで、チャート質骨材およびフェロニッケルスラグについて、これまで検討してきた蛍光法あるいは染色法を用いて顕微鏡観察を行い、アルカリ骨材反応性を調べ、すでに研究の進んでいるX線粉末回折分析、示差熱分析、モルタルバー試験、化学的反応性試験の結果とを比較検討した<sup>8-11)</sup>。

### 8. 2 試料

チャート試料としては、チャート質骨材のアルカリ骨材反応により膨張、ひびわれを起こしたコンクリート構造物から採取された9個のコアを用いた。これらの試料を肉眼で観察すると、コンクリート中に種々の形態のひび割れや反応生成物が認められた。ひび割れや反応生成物がもっとも多く認められたのは反応性骨材の周辺部のモルタル中で（図8-1a, b）、骨材中のひび割れが顕著にみられる安山岩によるアルカリ骨材反応<sup>3) 12)</sup>とは全般的に異なっている。この他に、アルカリ骨材反応によって形成されたとと思われるモルタル中の間隙やクラックを充填したものも観察され、比較的骨材中にはひび割れや反応生成物は少ない。また骨材の変質では、すでにしばしば報告されているように<sup>13-15)</sup>



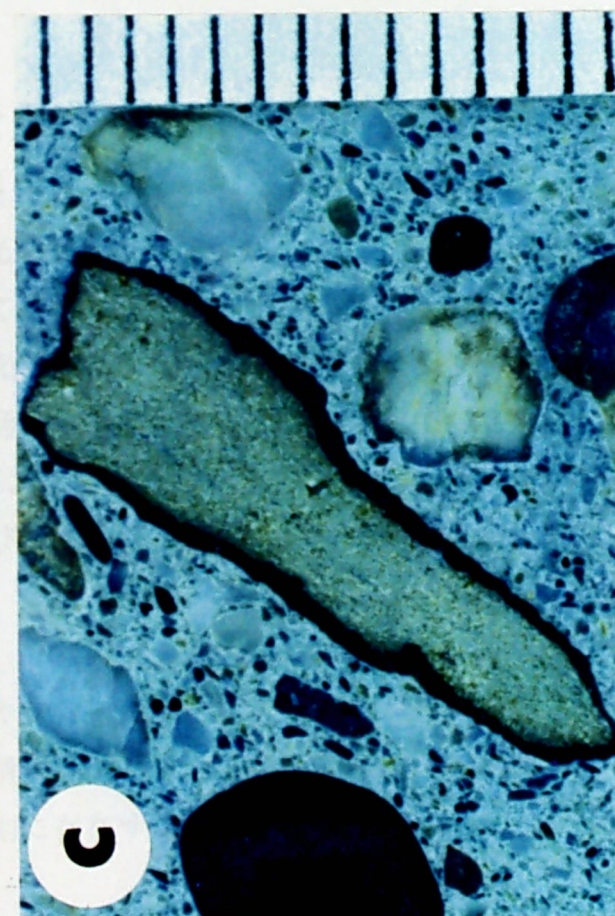
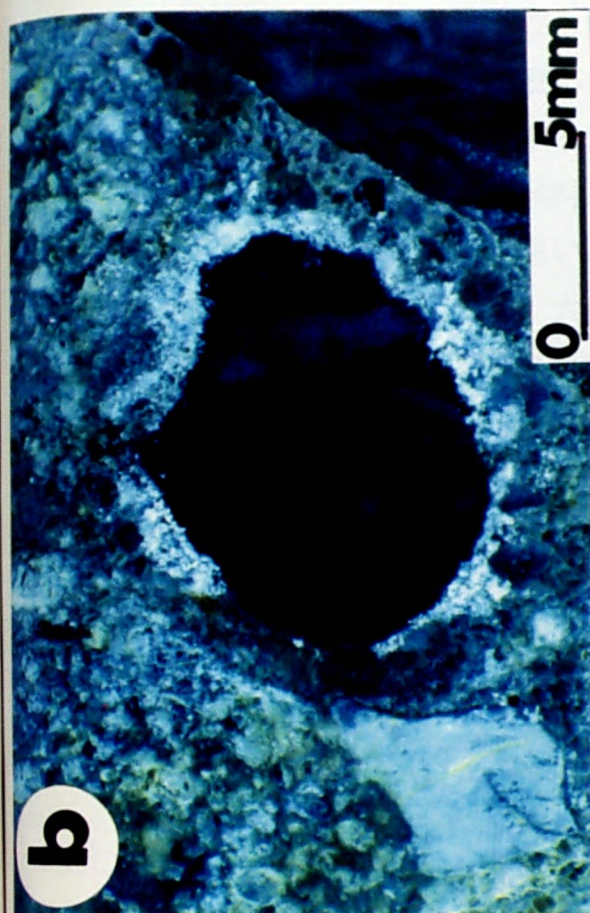


図8-1 チャート質骨材にみられる種々の形態のアルカリ骨材反応生成物  
 a:アルカリ骨材反応を起こしているコンクリートコア (試料Ch-16-1)  
 b:骨材周辺部のモルタル中の間隙に形成されたアルカリ骨材反応生成物 (試料Ch-16-1)  
 c:骨材周辺部に存在する反応環 (試料Ch-1-2)  
 d:骨材内部の微細な割れ目を充填しているアルカリ骨材反応生成物 (試料Ch-8-1)



骨材周縁部に反応環の存在しているもの（図 8-1c）、骨材の周縁部あるいは内部に白いアルカリ骨材反応生成物の滲出しているもの（図 8-1d）が認められるが、ほとんど変化のみられない骨材も存在する。

フェロニッケルスラグ試料としては、2種類のフェロニッケルスラグ（スラグ A および スラグ B）を用いた。スラグ A は、電気炉内で熔融したスラグをオープンピットに流出させ、大気冷却したいわゆる乾砕スラグで、スラグ B はスラグ樋より流下する熔融スラグに、ブロワーを使って高圧の大気を吹き付け飛散凝固させたいわゆる風砕スラグである。試料は、スラグ A からは冷却条件の異なる 3 試料、すなわち速い速度で冷却されたと考えられるスラグ A 上部、ゆっくりとした速度で冷却したと考えられるスラグ A 中部、上部と中部の中間程度の速度で冷却されたと考えられるスラグ A 下部の 3 種類を採取した。スラグ B からは代表的なもの 1 試料を採取した。採取した試料を肉眼および実体顕微鏡で観察すると、スラグ A の中部および下部の試料は白色で、軟らかく脆い粒子が大半であるが（図 8-2b, c）、上部の試料は、黒色で緻密な粒子から構成されている（図 8-2a）。スラグ B はスラグ A と同様に黒色で緻密な粒子から構成されているが、他の試料とは異なり球状のものがほとんどをしめている（図 8-2d）。

## 8. 3 染色法および蛍光法によるアルカリ骨材反応の発生状況の顕微鏡観察

### 8. 3. 1 染色法による偏光顕微鏡観察

アルカリ骨材反応を起こしているコンクリート中に発生している小さなひびわれの様子を調べるために偏光顕微鏡観察を行った。アルカリ骨材反応生成物は無色の非晶質物質であり、通常の薄片による顕微鏡観察では識別が困難である。そこで、2.2.2 で述べたような方法で赤色の染料を添加したシアノアクリレートによりクラックおよび反応生成物を染色した薄片を作製してこれを観察した<sup>9)</sup>。

#### (1) チャート質骨材

チャート質骨材によりアルカリ骨材反応を起こしているコンクリートではさまざまな形状をしたアルカリ骨材反応による割れ目が顕微鏡下で認められる。チャート質骨材の内部で不規則に存在するものや、石英細脈やこれに平行に生



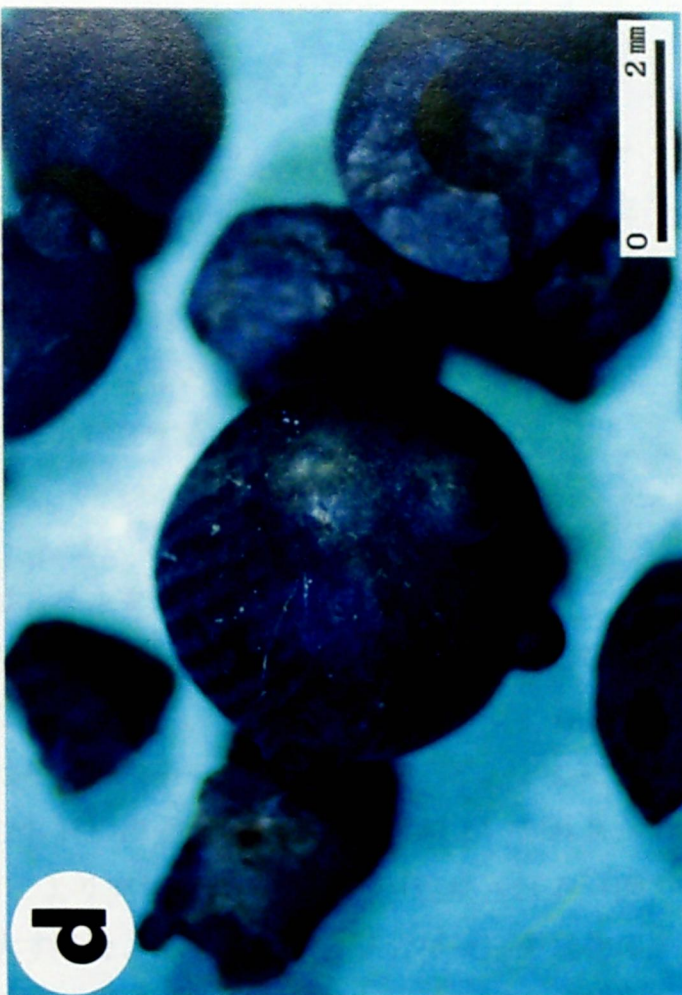
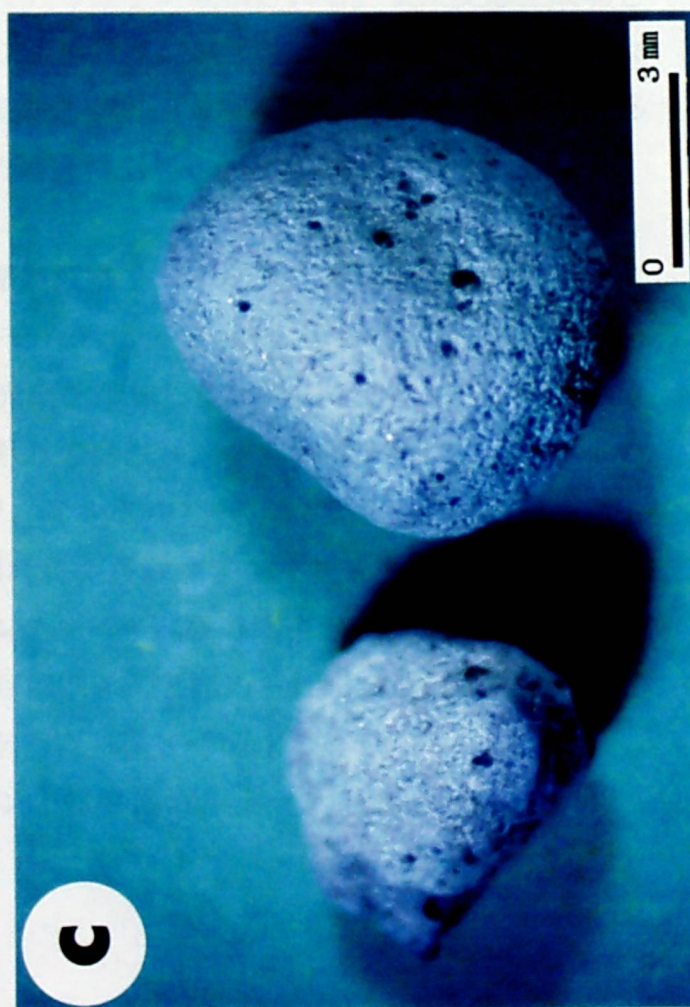
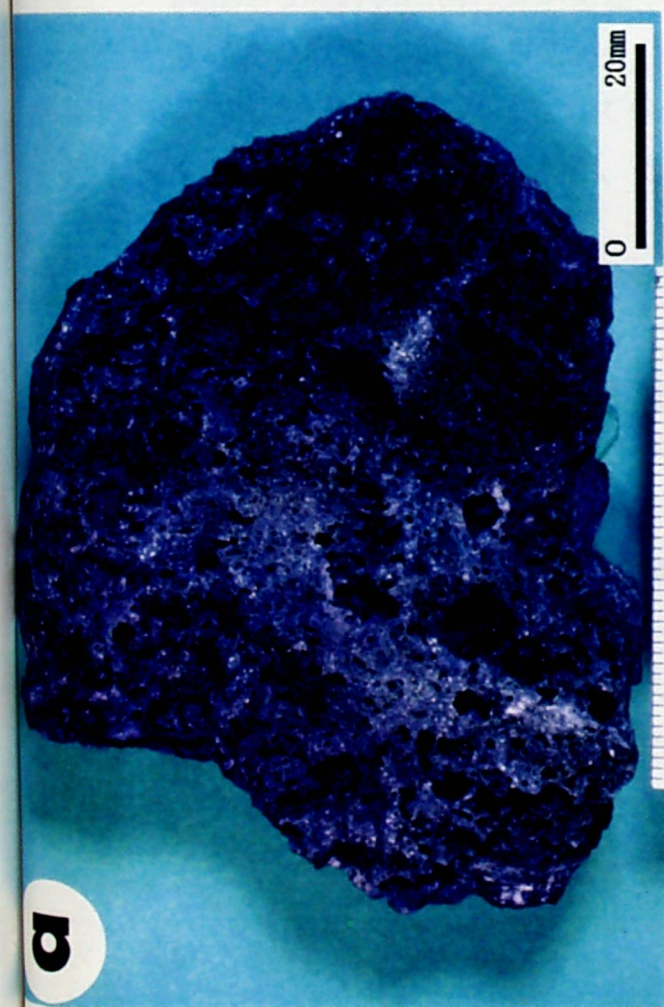


図8-2 フェロニッケルスラグの実体顕微鏡写真  
a:スラグA上部, b:スラグA中部, c:スラグA下部, d:スラグB



成しているものなどが存在しているが（図 8-3a, b）、これらの割れ目はチャートの粒径や石英の細脈にはとくに相関性はみられない。これら以外に反応生成物が潜晶質の部分にアメーバ状に散在するものも存在している。また、割れ目や反応生成物はモルタル中やモルタルと骨材の境界部においても観察されるが（図 8-3c）、骨材の周辺部を拡大してみると境界部が漸移し、シリカの溶脱が起こっていると推測されるところも存在する（図 8-3d）。

## (2) フェロニッケルスラグ

フェロニッケルスラグについては、モルタルバーを行った試験片について割れ目および反応生成物の偏光顕微鏡観察を行い、アルカリ骨材反応によるひび割れと構成鉱物との関係を観察した。その結果、上部の試料ではもっとも多くひび割れが観察され、その形状は不規則なものがほとんどである。とくにガラスやフォスフェライトを多く含む骨材の周囲や内部に連続性のよい割れ目が発達し、割れ目の中は反応生成物により充填されているのが観察される（図 8-4）。反応の著しいところを拡大すると、球状のアルカリ骨材反応生成物の部分から放射状に割れ目が発達している様子が観察される。また反応生成物と骨材との境界部は漸移しており、シリカの溶脱が起こっていることが推測される（図 8-4b）。これに対して中部および下部の試料ではエンスタタイトが多くみられ、ひび割れは少なく、その連続性も悪い（図 8-4c, d）。

### 8. 3. 2 蛍光法による実体顕微鏡観察

フェロニッケルスラグを用いてモルタルバー試験を行った試験片について、2.2.2 で述べたような方法により蛍光剤を添加したシアノアクリレートを充填させ、アルカリ骨材反応によるひび割れの発生状況を実体顕微鏡により観察した（図 8-5）。これらの試料の中で、モルタルバー試験で著しい膨張量を示した上部の試料は、連続性のよい割れ目が多数発生している状況が観察された（図 8-5a）。これに対して、モルタルバー試験で膨張量が少なかった中部と下部の試料については顕著な割れ目はほとんど認められず、連続性の悪い短い割れ目が一部に観察される程度であった（図 8-5b,c）。

なおモルタルバー試験は、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、アルカリ量は 1.2% である。



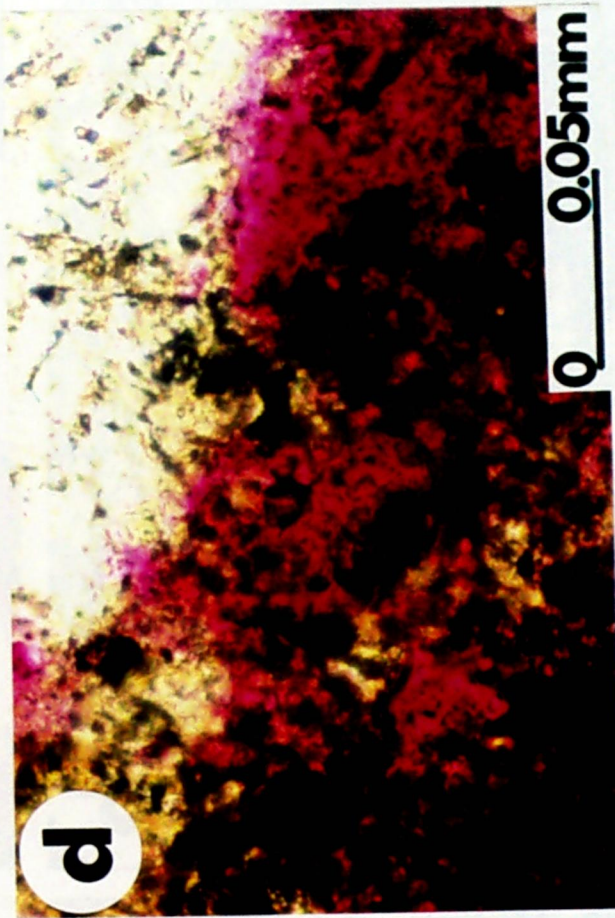
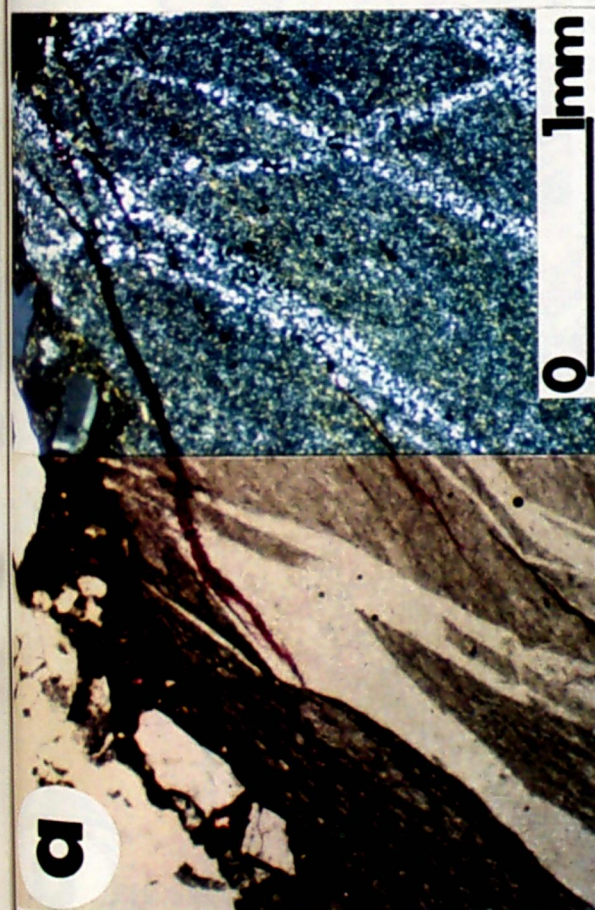
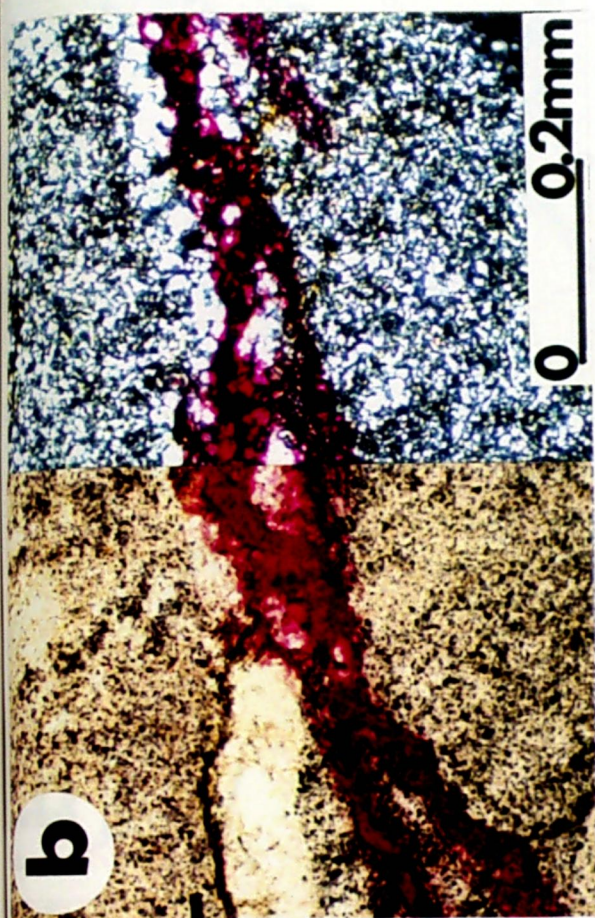


図8-3 骨材中あるいは骨材とモルタルの境界の間隙を充填しているアルカリ骨材反応生成物

a: 不規則な割れ目を充填しているアルカリ骨材反応生成物 (左: 単ニコル, 右: クロスニコル, 試料Ch-16-7)

b: 石英脈に平行な割れ目を充填しているアルカリ骨材反応生成物 (左: 単ニコル, 右: クロスニコル, 試料Ch-16-1)

c: モルタルと骨材の境界の間隙を充填しているアルカリ骨材反応生成物 (単ニコル, 試料Ch-7-1)

d: 骨材の周辺部の拡大写真, 境界部が漸移している (単ニコル, 試料Ch-8-1)



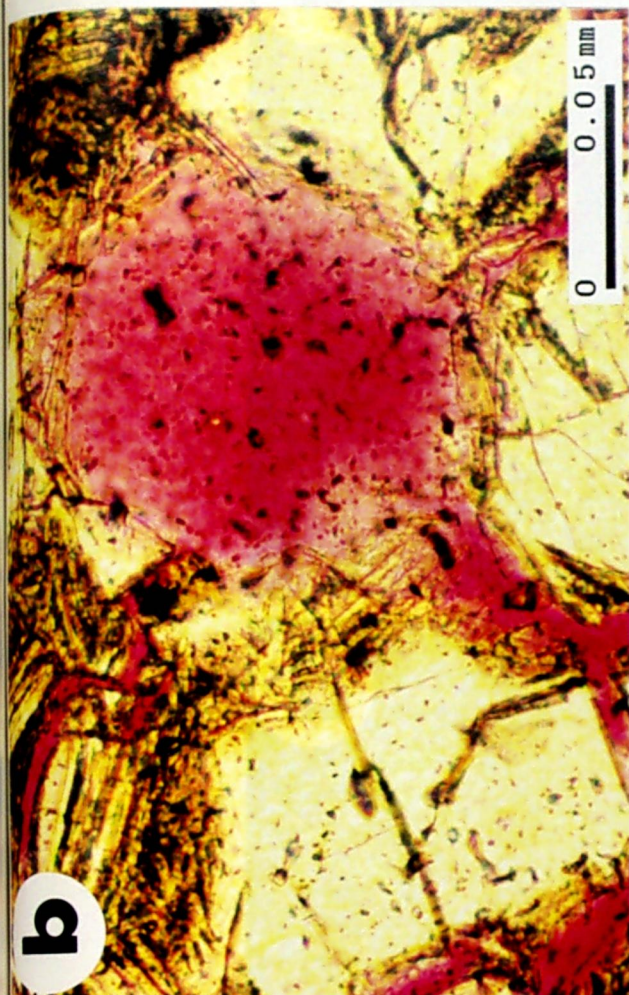


図8-4 フェロニッケルスラグを用いてモルタルバー試験を行った試料中にみられるアルカリ骨材反応生成物

a:骨材中に不規則に発達する連続性のよいひび割れ (単ニコル, スラグA上部)

b:球形のアルカリ骨材反応生成物, 境界部が漸移している (単ニコル, スラグA上部)

c,d:骨材中にみられる連続性の悪いひび割れ (いずれも単ニコル, c:スラグA中部, d: スラグA下部)



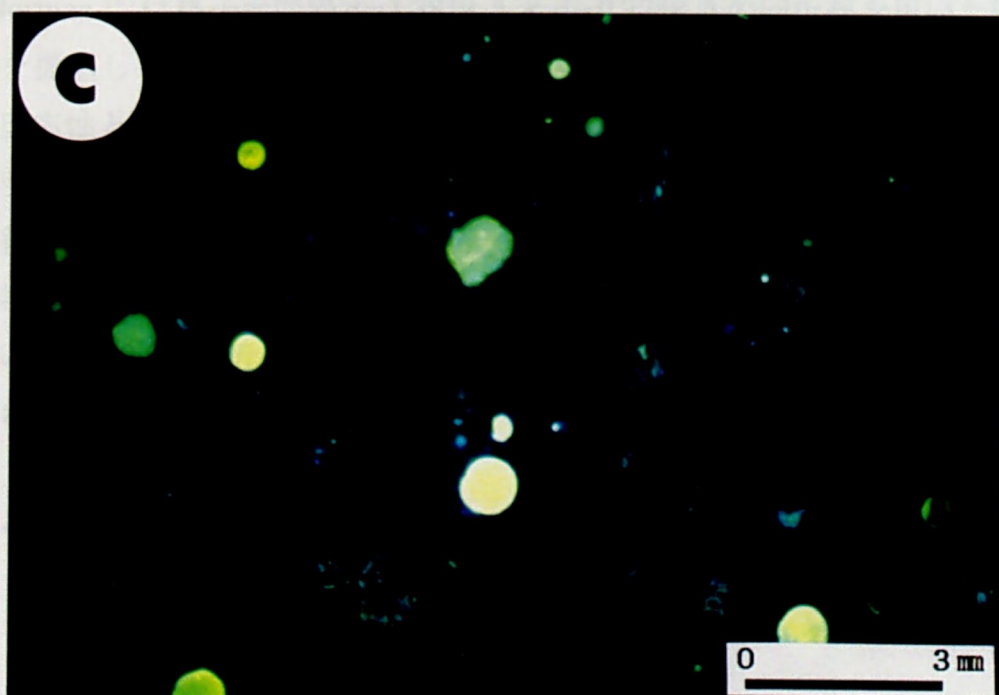
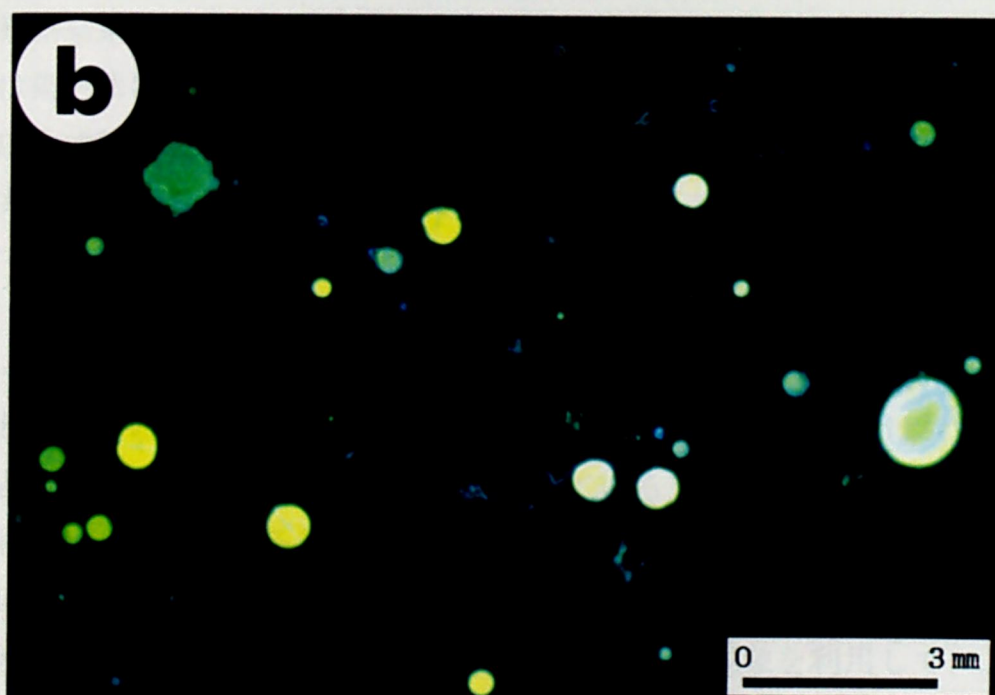
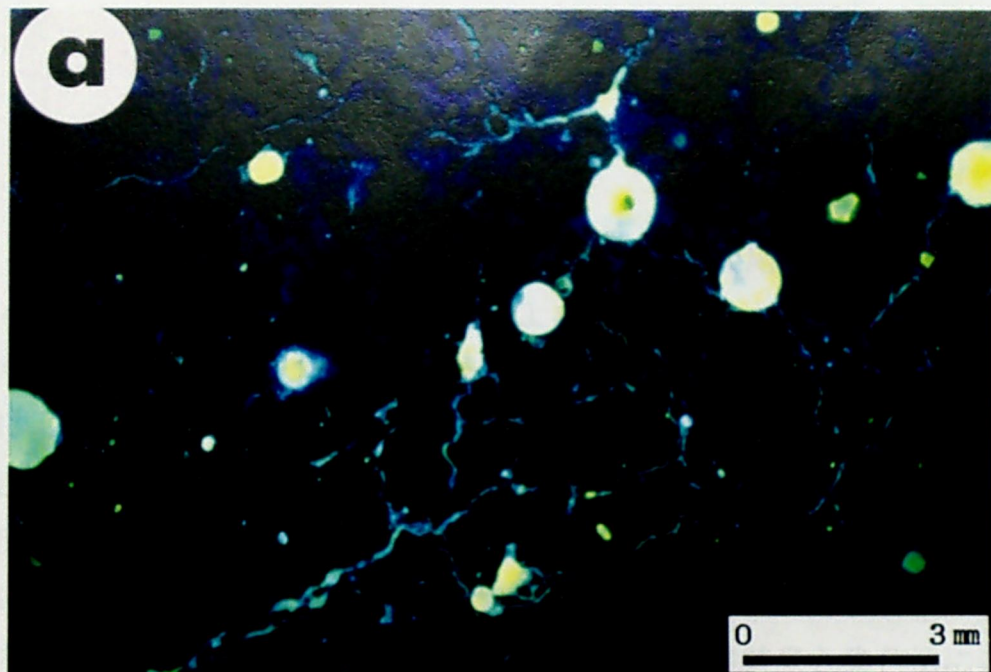


図8-5 モルタルバー試験を行った試験片に発生したひび割れの蛍光法による観察（紫外線）  
a:スラグA上部，b:スラグA中部，c:スラグA下部

## 8. 4 各種の試験法によるアルカリ骨材反応性の判定

### 8. 4. 1 チャート質骨材の染色法による観察

アルカリ骨材反応性を判定するためには、肉眼観察では生成物と反応環、染色法による偏光顕微鏡観察では内部、境界部、外部における割れ目や反応生成物に注目しなければならない。そこでこれらを半定量的に評価するために、上記の反応性を示す現象が全く認められないものを－、少量認められるものを＋、多量に認められるものを++とし3段階で表示した。30個の骨材についてまとめた結果は表8-1のようになる。全般的に肉眼観察結果と染色法による顕微鏡観察結果とはよい一致がみられ、肉眼観察で多量に反応生成物がみられた試料は染色法による観察でも骨材とモルタルの境界部や骨材外部において顕著な反応生成物が認められる。しかしながら、肉眼観察では全くアルカリ骨材反応の兆候が認められなかった試料でも、染色法による観察では著しい生成物が確認できたものも存在する。

### 8. 4. 2 チャート質骨材のX線粉末回折分析および示差熱分析

これまでの研究により、シリカ鉱物におけるアルカリ骨材反応はシリカ鉱物の結晶性に関連があることが明らかになっている<sup>16-19)</sup>。そこで、X線粉末回折分析では、結晶に格子欠陥や歪の多いものあるいは粒子がきわめて小さい試料は回折線がラインブロードニングを起こして不鮮明になり、分離が悪くなる。この現象は回折角が大きいほど顕著に現れる。この現象を利用して、Murata & Norman<sup>20)</sup>は格子面間隔 $d=1.3819\text{ \AA}$ と $d=0.3748\text{ \AA}$ の回折線を用いた結晶性指標を提唱し(図8-6(a))、立松<sup>21)</sup>、森野<sup>22)</sup>はこの結晶性指標とアルカリシリカ反応性との関連を報告している。本研究では水晶の回折線におけるさらに高角度の領域を詳細に調べ、新しく格子面間隔 $d=0.91597\text{ \AA}$ と $d=0.91508\text{ \AA}$ の回折線による結晶性指標(図8-6(b))を考案した。チャート質骨材中のシリカ鉱物の結晶性は、これら2つの結晶性指標により評価した。また示差熱分析については573℃付近の石英の吸熱ピークの高さを測定し、結晶性指標とした(図8-6(c))。

### 8. 4. 3 画像処理によるモルタルバー試験片中の割れ目の測定

表8-1 チャート質骨材の観察・分析結果

	肉眼観察		染色法による観察			X線粉末回折分析		示差熱分析
	生成物	反応環	内部	境界部	外部	$10 \cdot F \cdot a$	$(I_2+I_3+I_4)_s$	$\Delta T_s$
						b	$(I_2+I_3+I_4)_{RC}$	$\Delta T_{RC}$
Ch-3-1	++	+	-	++	++	2.12	0.04	0.08
Ch-6-1	-	-	++	+	+	4.48	0.16	0.37
Ch-6-2	-	+	+	+	+	3.43	0.11	0.24
Ch-6-3	-	-	++	++	+	5.17	0.09	0.14
Ch-7-1	-	-	+	++	+	2.50	0.08	0.14
Ch-7-2	+	-	-	+	-	4.96	0.09	0.37
Ch-7-3	-	+	-	-	-	6.88	0.59	0.45
Ch-8-1	-	-	++	++	++	2.16	0.09	0.24
Ch-8-2	+	+	-	+	+	6.58	0.36	0.35
Ch-8-3	-	+	++	++	+	5.17	0.09	0.33
Ch-8-6	-	-	+	+	+	3.69	0.19	0.33
Ch-8-8	-	+	+	+	+	5.74	0.18	0.53
Ch-14-1	-	+	++	++	+	2.84	0.08	0.14
Ch-14-3	-	+	++	++	++	6.14	0.29	0.69
Ch-15-1	-	-	++	+	+	8.49	0.76	0.78
Ch-15-2	-	-	+	+	+	8.27	0.77	0.69
Ch-16-1	++	+	++	+	++	7.29	0.63	0.71
Ch-16-3	-	+	+	+	+	5.49	0.33	0.33
Ch-16-4	-	+	-	++	++	5.94	0.18	0.53
Ch-16-5	-	-	+	+	+	7.88	0.83	0.69
Ch-16-6	++	+	-	+	++	7.10	0.20	0.61
Ch-16-7	+	-	+	+	+	7.50	0.63	0.65
Ch-17-1	-	+	-	++	++	6.09	0.23	0.37
Ch-17-2	+	+	+	++	++	5.94	0.16	0.45
Ch-17-6	-	+	+	+	++	7.74	0.48	0.57
Ch-17-7	-	+	+	+	+	6.85	0.48	0.69
Ch-17-8	-	+	++	+	+	4.69	0.09	0.25
Ch-19-1	-	+	-	++	++	7.09	0.58	0.71
Ch-19-3	-	-	-	-	+	5.58	0.18	0.73
Ch-19-6	-	+	-	+	++	5.72	0.07	0.18
水晶						10.00	1.00	1.00
秘刀エ辰						5.56	0.55	0.53
玉髓						0.83	0.06	0.04
瑪瑙						0.83	0.00	0.02
碧玉						0.39	0.00	0.06

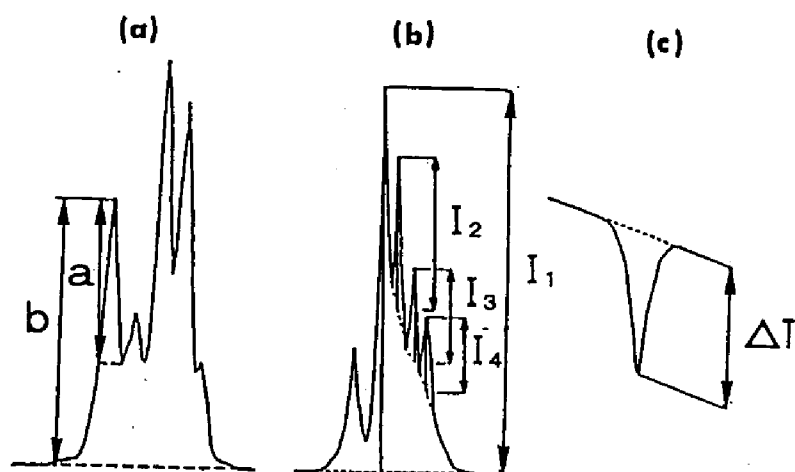


図8-6 シリカ鉱物の回折線および吸熱ピークのみだれの評価

a: 水晶の  $d=1.3819 \text{ \AA}$  と  $d=1.3748 \text{ \AA}$  における回折線 ( $CI=10 \cdot F \cdot b/a$ )

b: 水晶の  $d=0.91597 \text{ \AA}$  と  $d=0.91508 \text{ \AA}$  における回折線 ( $CI=(I_2+I_3+I_4)_s/(I_2+I_3+I_4)_{RC}$ )

c: 水晶の吸熱ピーク ( $CI=\Delta T_s/\Delta T_{RC}$ )

(S: 試料, RC: 水晶)



フェロニッケルスラグによりモルタルバー試験片に発生した割れ目を画像処理により定量化した。フェロニッケルスラグのモルタルバー試験結果は図 8-7 のとおりで、3つの試料の中で中部と下部のものは膨張率は小さいが、上部の試料はとくに膨張量が大きく、6ヶ月後の値は0.176%に達している。モルタルバー試験法による判定では、上部は有害、中部および下部は無害となる。蛍光法による観察では、紫外線を照射すると割れ目や気泡の部分は他の部分に比べて著しく輝度が大きくなり、また発光している気泡と割れ目を比較すると、気泡の方が割れ目よりも輝度が大きいので、簡単な操作で割れ目の部分のみを抽出することができる（図 8-8）。

このようにして得られた2値画像から割れ目の量と長さを求め、その結果をモルタルバー試験結果と比較すると割れ目の量では若干のばらつきがみられるものの（図 8-9(a)）、割れ目長さについては膨張率とよい相関性が認められる（図 8-9(b)）。

#### 8. 4. 4 フェロニッケルスラグの化学的反応性試験

骨材のアルカリ骨材反応性を迅速に調べる方法として、化学法（ASTM C-289）が広く用いられている。この方法では一定の粒度と量の骨材からどの程度シリカが溶脱するか、アルカリ濃度がどの程度減少するかをアルカリ骨材反応性を調べる目安としている<sup>23-24)</sup>。そこで、スラグ A の上部、中部、下部の各試料を用いて粒度あるいは磁性の違いによるシリカの溶脱量およびアルカリ濃度減少量の経時変化を調べた。分析にあたっては、便宜的に試料の粒度を100メッシュ以下に揃え、試料の量は5.0gとした。12時間、24時間、36時間、48時間後における分析結果は図 8-10、図 8-11に示すとおりである。

シリカ溶脱量の経時変化を全岩試料についてみると図 8-9 のようになり、スラグ A の上部とスラグ B は、時間とともに大きく増加しているが、スラグ A の中部は変化は小さい（図 8-10a）。また、粒度による違いはほとんどみられず（図 8-10b）、磁性の違いでは、磁性の強い試料にややシリカ溶脱量が多い傾向があるが、顕著な相違は認められない（図 8-10c）。

アルカリ濃度減少量は、全岩分析ではスラグ A の上部とスラグ B の試料は、減少量が大きく、時間とともにアルカリ濃度が減少する傾向にある。しかしながら、スラグ A の中部の試料では36時間を過ぎると逆にアルカリ濃度が増加

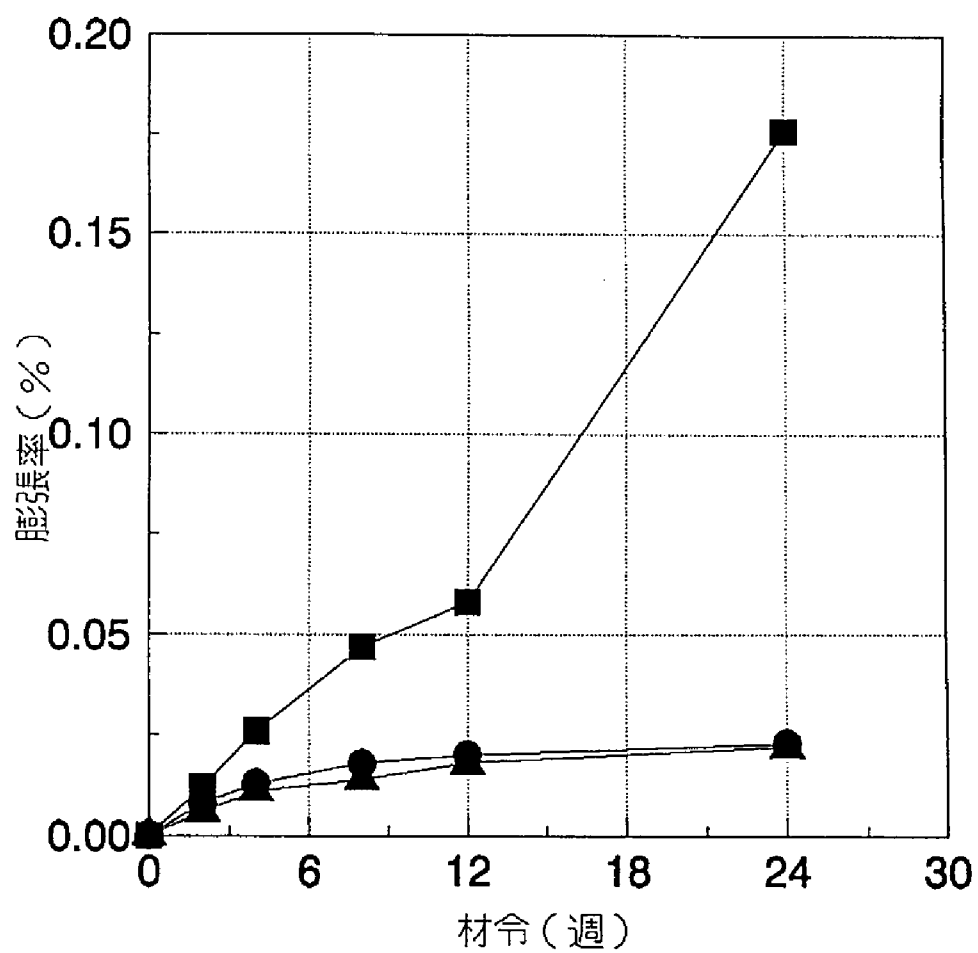


図8-7 フェロニッケルスラグの膨張特性

■：スラグA上部，●：スラグA中部，▲：スラグA下部

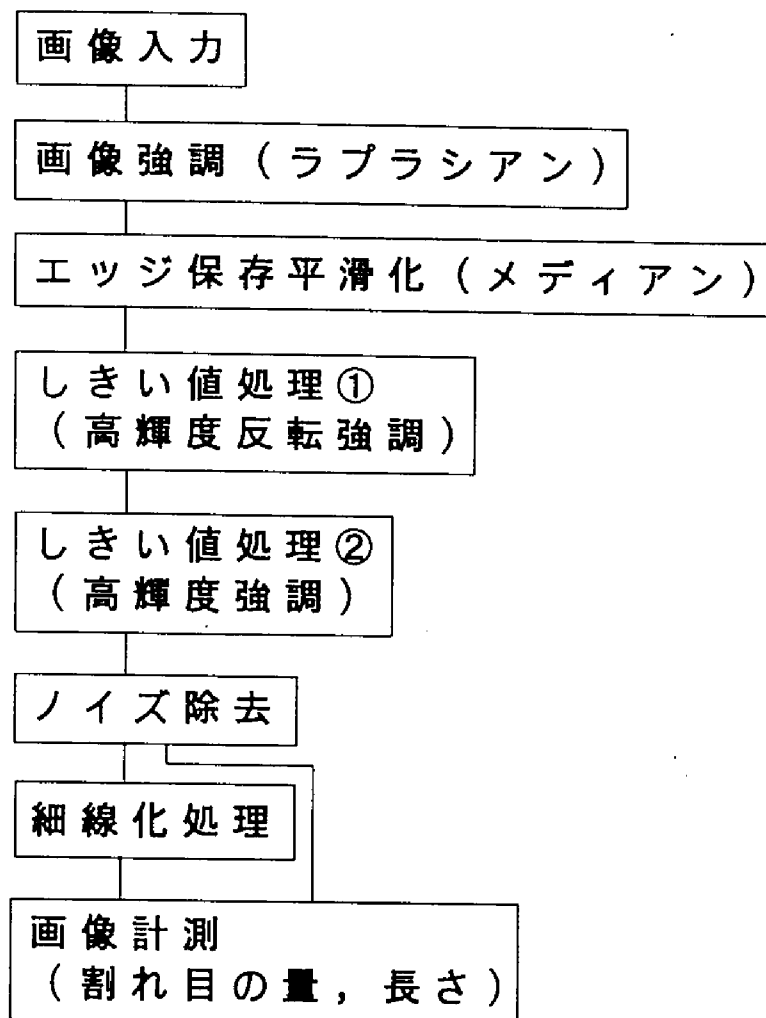


図8-8 モルタルバー試験を行った試料にみられるひび割れを抽出、解析する画像処理フロー

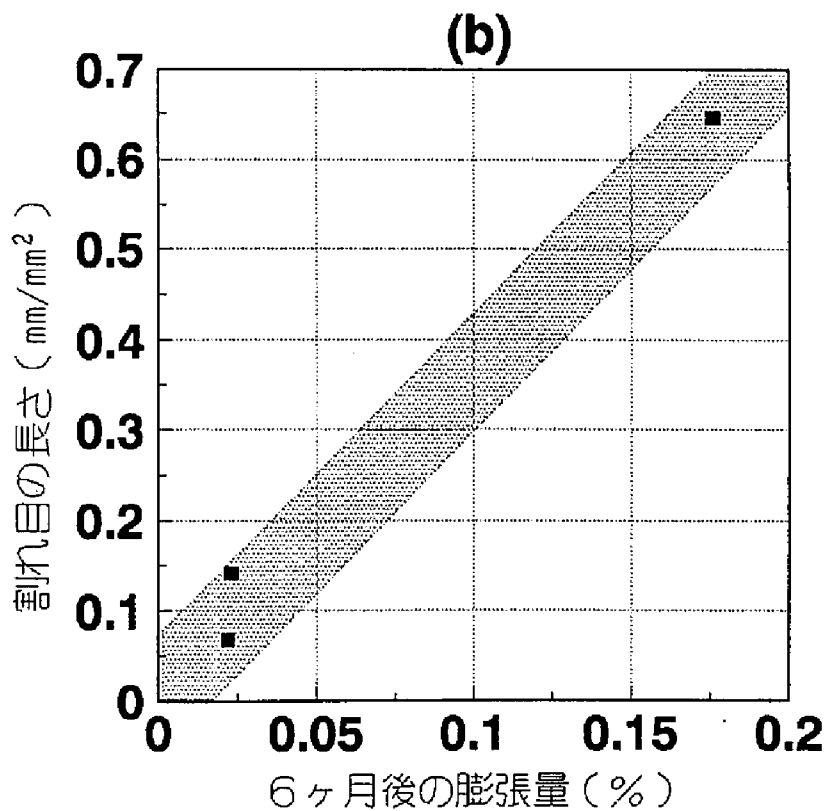
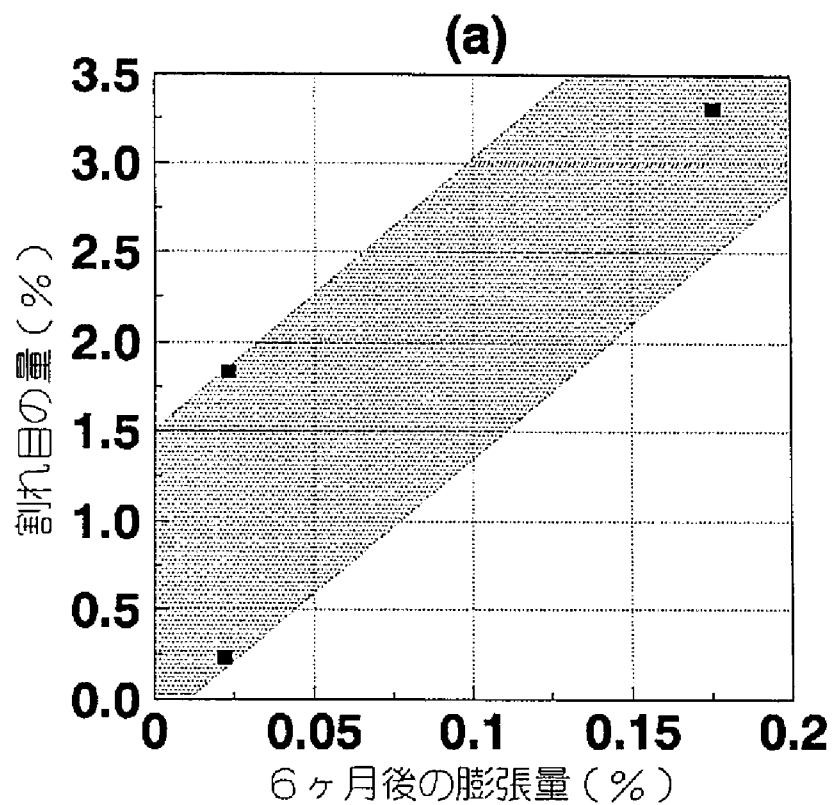


図8-9 画像処理結果とモルタルバー試験結果との関係  
 (a) 割れ目の量と膨張量との関係  
 (b) 割れ目の長さと膨張量との関係



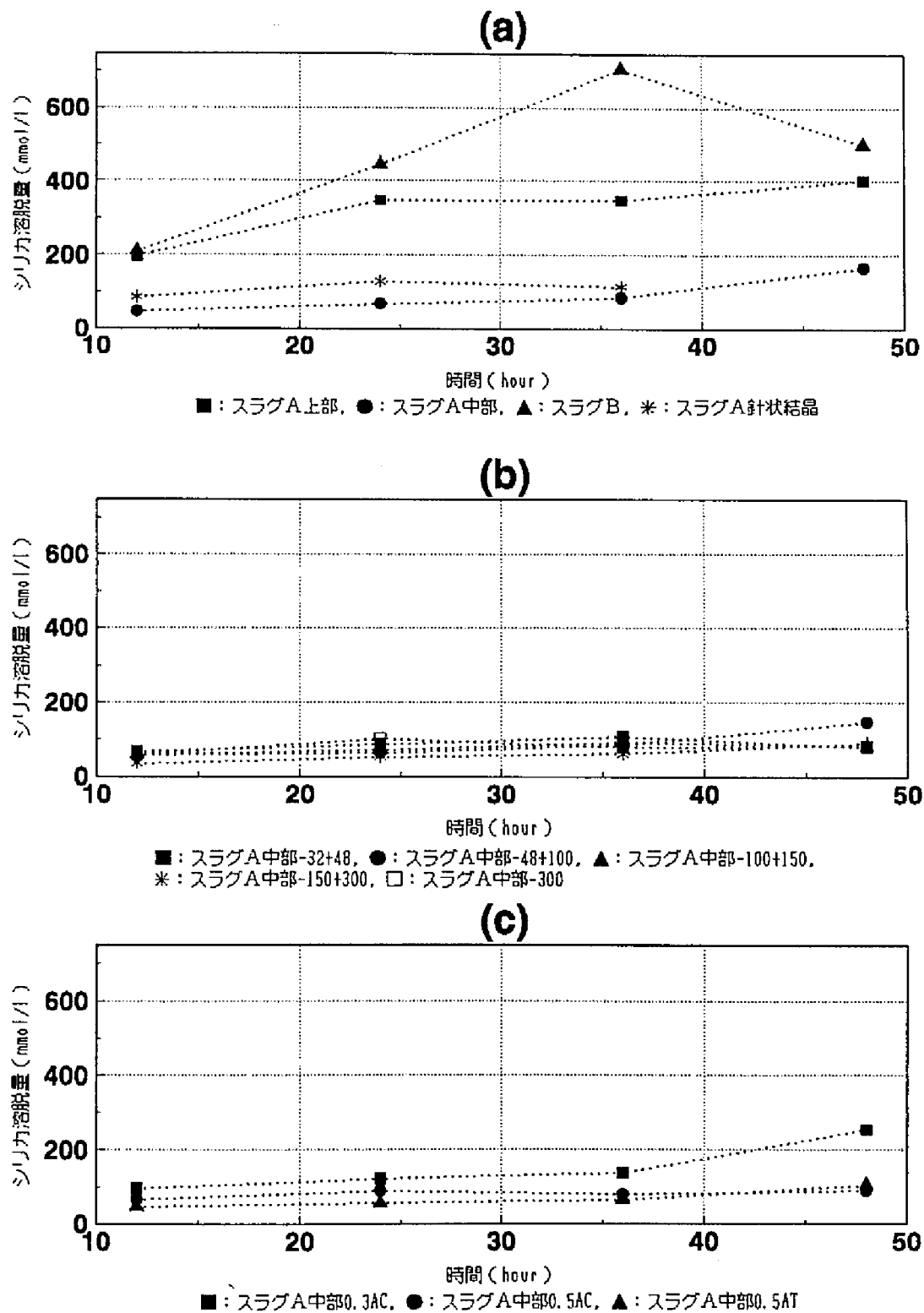


図8-10 シリカ溶脱量の経時変化 (a) バルク, (b) 分級した試料, (c) 磁選した試料)

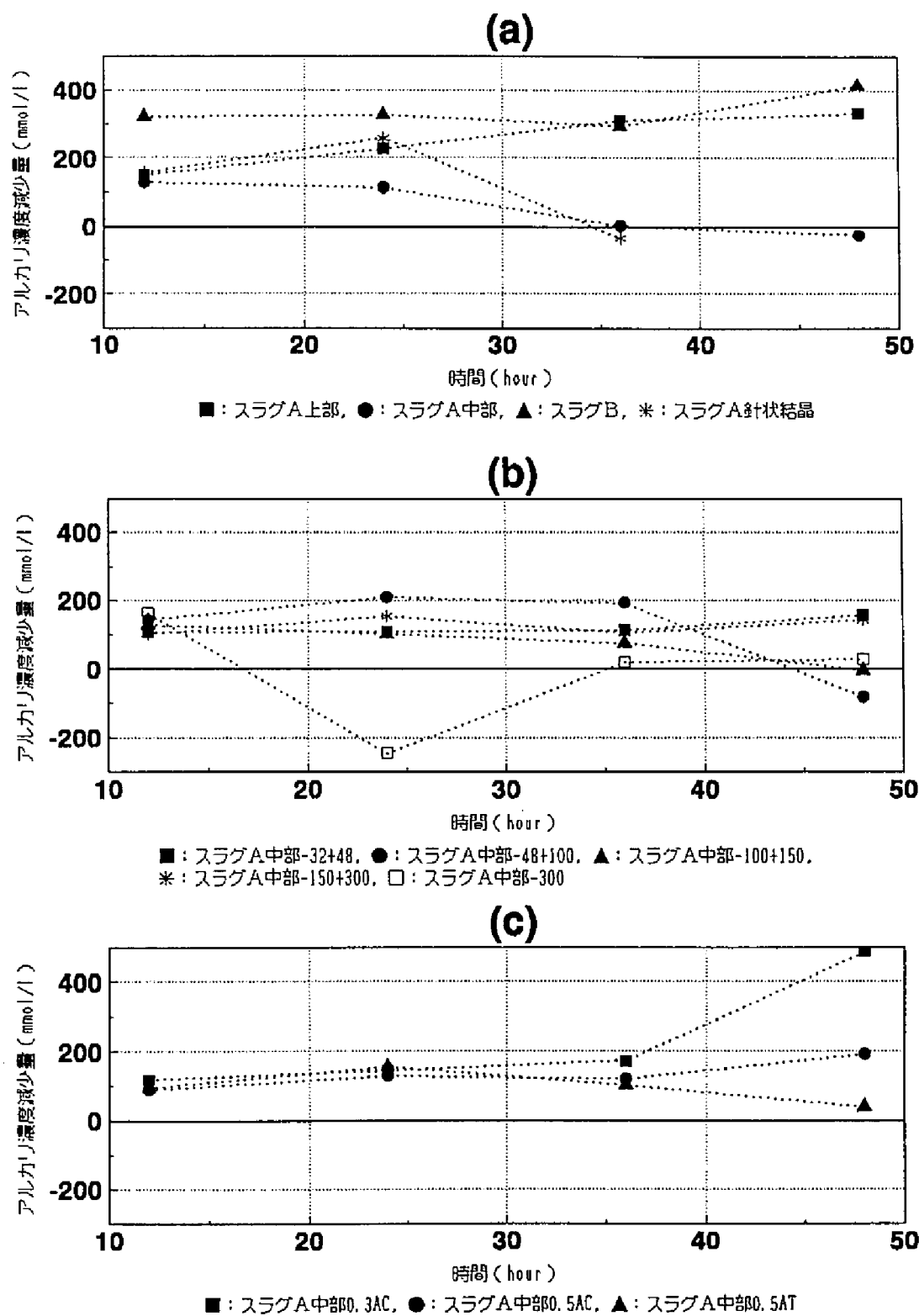


図8-11 アルカリ濃度減少量の経時変化 (a)バルク, (b)分級した試料, (c)磁選した試料)

するという現象が起こっている（図 8-11a）。次に述べる粒度、磁性を異にする試料においても同様の現象を示すものが含まれている。その差はそれほど顕著ではない（図 8-11b, c）。しかし異常値を示す試料も存在する。

## 8. 5 アルカリ骨材反応性の評価

### 8. 5. 1 チャート質骨材のアルカリ骨材反応性の評価

アルカリ骨材反応を起こしたコンクリート中に使用されていた 30 個のチャート質骨材について染色法による観察、X線粉末回折分析および示差熱分析の結果を比較し、チャート質骨材のアルカリ骨材反応性について検討した。

まず、染色法による観察結果と個々の結晶性指標との相関関係をみると、格子面間隔  $d=1.3819 \text{ \AA}$  と  $d=0.3748 \text{ \AA}$  の回折線を利用した結晶性指標では、肉眼および顕微鏡観察結果との間には相関性は認められない（図 8-12(a)）。しかし、新しく考案した格子面間隔  $d=0.91597 \text{ \AA}$  ,  $d=0.91508 \text{ \AA}$  による結晶性指標でみると、肉眼および顕微鏡観察でアルカリ骨材反応生成物が顕著にみられた試料は、1 試料を除きいずれも結晶性指標の値は小さくなっている。しかし結晶性指標の値が小さくてもアルカリ骨材反応の認められない試料も存在する（図 8-12(b)）。この点については、アルカリ骨材反応は、コンクリート材料の条件および環境条件などが複雑に重なって起こる現象であり、反応性骨材であっても他の条件が満たされないと反応は進まないことがあるためと考えられる。なお、染色法による観察結果と示差熱分析結果との間には相関関係は認められない（図 8-12(c)）。

さらに、染色法による反応性の評価と 2 つの結晶性指標との関係を考察すると、アルカリ骨材反応が顕著に認められるチャート質骨材は、そのほとんどが格子面間隔  $d=1.3819 \text{ \AA}$  ,  $d=0.3748 \text{ \AA}$  による結晶性指標の変動が大きい領域から格子面間隔  $d=0.91597 \text{ \AA}$  ,  $d=0.91508 \text{ \AA}$  による結晶性指標の変動が大きい領域にかけて存在している（図 8-13）。このことから、チャート質骨材が反応性であるか非反応性であるかの境界は、格子面間隔  $d=0.91597 \text{ \AA}$  ,  $d=0.91508 \text{ \AA}$  による結晶性指標の変動が大きい領域の中にあるものと推測される。このことから、チャート質骨材のアルカリ骨材反応性を判定するには、格子面間隔  $d=0.91597 \text{ \AA}$  ,  $d=0.91508 \text{ \AA}$  による結晶性指標の方が、格子面間隔  $d=1.3819 \text{ \AA}$  ,  $d=0.3748 \text{ \AA}$  による結晶性指標よりも有効ではないかと考えられる。

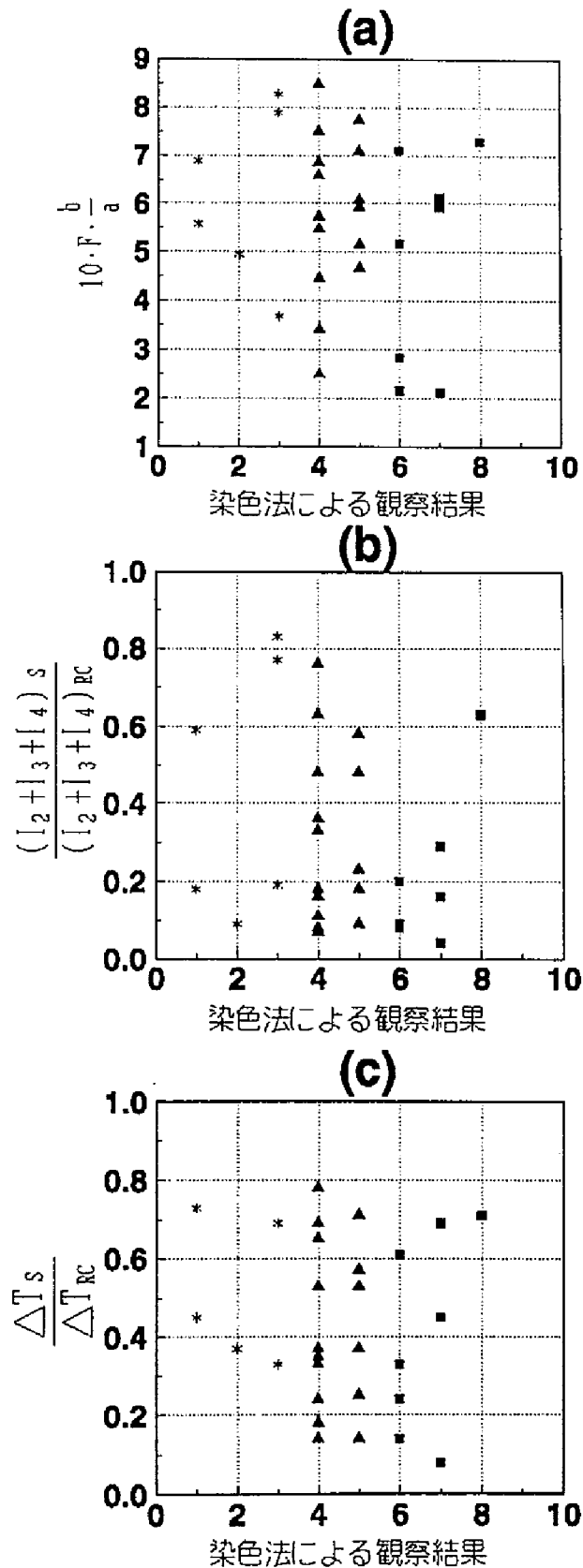
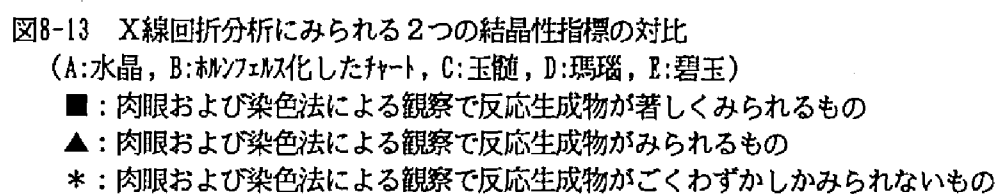


図8-12 肉眼および染色法による観察結果とX線回折分析および示差熱分析との関係

- ：肉眼および染色法による観察で反応生成物が著しくみられるもの
- ▲：肉眼および染色法による観察で反応生成物がみられるもの
- \*：肉眼および染色法による観察で反応生成物がごくわずしかみられないもの





### 8. 5. 2 フェロニッケルスラグのアルカリ骨材反応性の評価

蛍光法、染色法によるモルタルバー試験片の観察結果、およびモルタルバー試験、化学的反応性試験の結果をもとにフェロニッケルスラグのアルカリ骨材反応性について検討した。

蛍光法、染色法により多数のひび割れが観察され、モルタルバー試験法による膨張率が大きく、かつ化学的試験法においてシリカ溶脱量とアルカリ濃度減少量がともに多い試料はスラグ A の上部である。この試料は、構成鉱物としてガラスとフォルステライトを多く含んでいる。一方、モルタルバー試験による膨張率が小さく、さらにシリカ溶脱量が少なく、アルカリ濃度減少量も少ない試料はスラグ A の中部で、この試料にはエンスタタイトが多く含まれている。これらのことから、アルカリ骨材反応を引き起こす可能性の高い鉱物としては、ガラスとフォルステライトの 2 つがあげられる。ガラスやフォルステライトはスラグの急冷層に多く形成されていることから、フェロニッケルスラグをコンクリート用骨材として使用するためには、スラグをゆっくり冷却し、できるだけガラスやフォルステライトの形成を少なくする必要があると考えられる。

## 8. 6 結言

チャート質骨材あるいはフェロニッケルスラグによるアルカリ骨材反応について検討した結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) アルカリ骨材反応により損傷のみられるコンクリート構造物に含まれていた 30 個のチャート質骨材試料について、赤色の染料を添加したシアノアクリレートを用いてアルカリ骨材反応により形成されたクラックや反応生成物を染色し、偏光顕微鏡により観察した。その結果、骨材中、モルタルと骨材の境界部、およびモルタル中にさまざまな形状のクラックや反応生成物が認められた。また、染色法による観察結果と X 線粉末回折分析、示差熱分析結果とを比較検討することによりチャート質骨材のアルカリ骨材反応性を評価したところ、X 線回折分析における  $d=0.91597 \text{ \AA}$  と  $d=0.91508 \text{ \AA}$  の回折線から導かれた指標がもっともアルカリ骨材反応との関連が強いことが明らかになった。
- (2) フェロニッケルスラグのモルタルバー試験片について、蛍光法により割れ目の発生状況を可視化するとともに、画像処理によりひび割れを定量的に把握

した。その結果、急冷されたスラグを使用した試料がとくにひび割れが顕著であり、モルタルバーの膨張量も大きいことが明らかになった。さらに、フェロニッケルスラグの蛍光法および染色法による観察結果とアルカリ骨材反応性試験との関係から、ガラス、フォルステライトを多く含む試料は、主にエンスタタイトからなるスラグに比べて反応性が大きいことが明らかになった。

## 参考文献

- 1) Dolar-Mantuani L. : Handbook of Concrete Aggregates a Petrographic and Technological Evalution, 79-125, Noyes Publications, (1983)
- 2) Gillott J.E. : Alkali- reactivity Problems with Emphasis on Canadian Aggregates, Eng.Geol., Vol.23, 29-43, (1986)
- 3) 日本材料学会：アルカリ骨材反応に関するシンポジウム, 1-171, (1985)
- 4) 森野 壱二：わが国のチャート質骨材のアルカリ骨材反応例, 骨材資源, No.70, 63-73, (1986)
- 5) 山田 優：廃棄物の骨材化と道路材料への利用, 資源・素材'89分科研究会資料, B, 17-20, (1989)
- 6) 桑山 忠・山田 優・本多淳裕・三瀬 貞：電気炉スラグの有効利用の可能性, 骨材資源, 21[84], 207-214, (1990)
- 7) 平井 宏・鍋谷 裕・竹内 甫・板迫征二：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリート消波ブロックの製造と暴露試験, セメントコンクリート, 514, 41-48, (1989)
- 8) 楠田 啓・佐藤 秀・西山 孝：チャート質骨材のアルカリシリカ反応性試験結果の比較, 資源・素材'89分科研究会資料, B, 9-12, (1989)
- 9) 西山 孝・楠田 啓・中野錦一：チャート質骨材のアルカリシリカ反応について, 骨材資源, 86[22], 73-81, (1990)
- 10) 楠田 啓・西山 孝・平井 宏・村井浩介・鍋谷 裕：フェロニッケルスラグの骨材化ーアルカリ骨材反応性についてー, 資源・素材'90分科研究会資料, D, 5-8, (1990)
- 11) 楠田 啓・西山 孝・平井 宏・村井浩介・鍋谷 裕：ニッケルスラグのアルカリ骨材反応性, 建設用原材料, 1[1], 14-19, (1991)
- 12) 西山 孝・寺尾哲史・中野錦一：安山岩のアルカリシリカ反応性鉱物およ

- び反応生成物について, 材料, 37[418], 825-831, (1988)
- 13) Idorn, G.M. : Durability of Concrete Structures Denmark, Thesis of Doctor of Science, 82-169, (1967)
- 14) 立松英信・高田 潤: アルカリ骨材反応と骨材の反応環について, 骨材資源, No.73, 36-41, (1987)
- 15) 西山 孝・日下部吉彦: アルカリシリカ反応生成物の染色と顕微鏡観察, 土木学会論文集, No.390, 107-112, (1988)
- 16) 丸 章夫: 鉱物学的立場からみた骨材の品質, セメント・コンクリート, No.416, 129-134, (1981)
- 17) 渋谷長美・藤崎邦弥・山本博之・今立文雄・堀内しほう: アルカリ反応性骨材に関する岩石学的調査, 材料, 35[392], 32-37, (1985)
- 18) 日下部吉彦・西山 孝・木村 訓・楠田 啓・福田浩則・後藤理文: アルカリ骨材反応におけるシリカ鉱物-とくにトリディマイト, クリストバライト, 潜晶質石英-の潜在反応性について, 水曜会誌, 20[7], 429-434, (1986)
- 19) 滝永 進・立松英信・岩崎 孝: 骨材のアルカリ反応特性, 骨材資源, No.68, 201-207, (1986)
- 20) K.J.Murata and M.B.Norman, II. : An Index of Crystallinity for Quartz, Am. Jour. Sci., 276, 11, 20-1130, (1976)
- 21) 立松英信: アルカリ骨材反応の判定と骨材の評価法, 資源・素材'87 分科研究会資料, B, 15-18, (1987)
- 22) 森野奎二・柴田国久・岩国栄治: チャート質岩のアルカリ骨材反応性, 粘土科学, 27[4], 199-210, (1987)
- 23) 高田 潤: 骨材の評価システムに関する提言, 資源・素材'88 分科研究会資料, O, 47-48, (1988)
- 24) 佐々木孝彦・水野 清: 化学法における判定と問題点, 資源・素材'88 分科研究会資料, O, 39-42, (1988)



## 第9章 軽量コンクリート中の気泡や間隙の可視化と凍結融解に対する耐久性の評価

### 9. 1 緒言

建設構造物の大規模化に伴って、建設用軽量材料の開発が重要な課題となってきた。コンクリートの分野では、内部に多数の気泡をもった軽量コンクリートが開発され、実用に供されている。この種のコンクリートに含まれている種々の気泡や微細な間隙は軽量化に貢献しているが、それらの性質や強度や耐久性などに及ぼす機構は判明していないことが多く<sup>1-2)</sup>、このことが新しい軽量コンクリートの開発の妨げとなっている。そこで、蛍光法あるいは染色法を利用して、軽量コンクリート中の気泡や微細な間隙の評価を試みた。さらに画像処理を併用することによって、気泡の大きさ、量、連続性などの定量的な評価方法について検討した<sup>3-5)</sup>。

なお、軽量コンクリートには、多数の気泡を骨材中に含ませる場合、セメントペースト中に含ませる場合、さらに両方に含ませる場合の3種類がある。ここでは、骨材中およびセメントペースト中の2つについて調べ、両者が共存するときは両方の性質が表れるものと考えた。

### 9. 2 試料

供試試料としては、オートクレーブ養生により多数の気泡を発生させた気泡コンクリート（試料No.1）と、膨張頁岩を焼成した人工軽量骨材を粗骨材として用いた軽量骨材コンクリート（試料No.2）の2種類を使用した。なお、試料No.2については5℃／－18℃の水中繰り返し凍結融解試験が行われ、150サイクルまでは顕著な劣化は認められなかった。

すでに2. 2で述べたように、蛍光法では気泡や微細な間隙の観察に際して、前処理としてあらかじめ蛍光染料を添加した樹脂を充填する方法が2つある。すなわち蛍光剤を添加したシアノアクリレートを切断表面から浸透させ、過剰の樹脂を削り取る方法と蛍光剤および赤色の染料を添加したメチルメタアクリ

レートを試料の外部から浸透させた後に切断する方法である<sup>6-9)</sup>。さらに本章の研究においては後者について、樹脂を浸透させる段階で、常圧の状態と減圧の状態の2通りを用い、浸透条件に差をつけることによって3つの条件の異なる浸透法を採用し、比較検討した。

### 9. 3 セメントペースト中および軽量骨材中の気泡の形状

#### 9. 3. 1 セメントペースト中の気泡の観察

気泡コンクリート (No.1) 中の気泡の存在状況を知るために、試料表面からシアノアクリレートを浸透させ、紫外線照射により観察すると、図 9-1a のようになる。気泡の部分のみが黄色に発光しており、気泡の分布状態を鮮明に把握することができる。また、試料の外部からメチルメタアクリレートを減圧状態で浸透させた試料では、気泡は蛍光剤と同時に樹脂に添加されている赤色の染料によって着色されているので、紫外線照射よりも可視光によって鮮明に識別できる (図 9-1b)。なお、後に述べるように減圧状態で充填させると、樹脂はセメントペースト中に存在している微細な間隙のみならず気泡にまで充填されるので、全体が発光することになる (図 9-3a)。したがって、この場合はセメントペースト部分と気泡との間の輝度の差が小さくなり、気泡の識別は困難である。

#### 9. 3. 2 軽量骨材中の気泡の観察

軽量骨材 (多量の気泡を含む) を使用したコンクリート (No.2) について、減圧状態でメチルメタアクリレートを充填させ観察を行った。この場合は、軽量骨材の周囲が発光し、セメントペースト中の微細な間隙には樹脂が十分に充填している (図 9-2b)。しかしながら、可視光による観察から判断すると、軽量骨材の内部の気泡には樹脂がほとんど充填されていない (図 9-2a)。すなわち、軽量骨材中の気泡は連続性がきわめて乏しいことがわかる。

### 9. 4 気泡や間隙の連続性

すでに述べたように、気泡や間隙には連続性の異なるものが存在するので、この点についてさらに検討した。まず、同一試料 (No.1) についてメチルメタアクリレートを減圧状態および常圧状態のもとで充填させた2種類の試料を

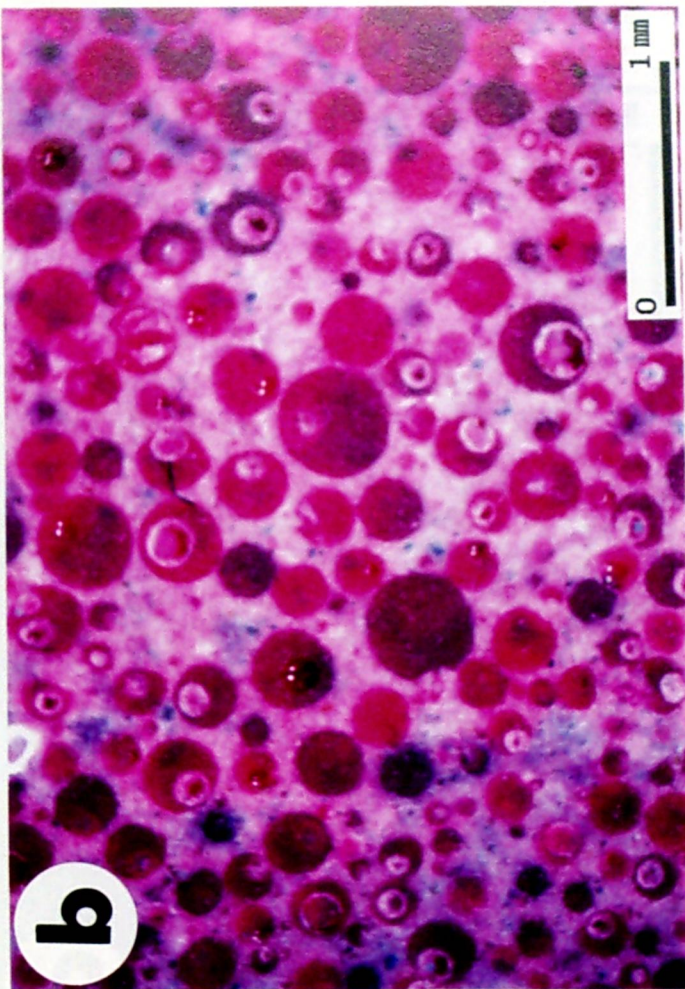
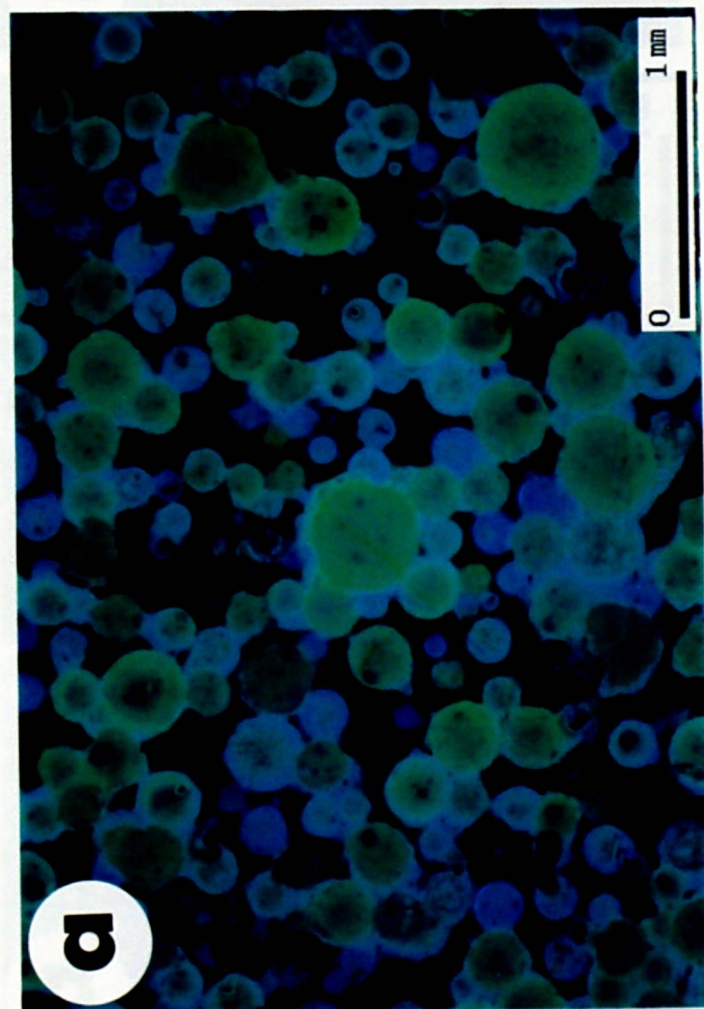


図9-1 樹脂を充填した気泡コンクリートの顕微鏡観察 (試料No.1)

a: シアノアクリレートを表面から浸透させた試料 (紫外線)

b: 減圧状態で外部からメチルメタクリレートに浸透させた試料 (可視光)



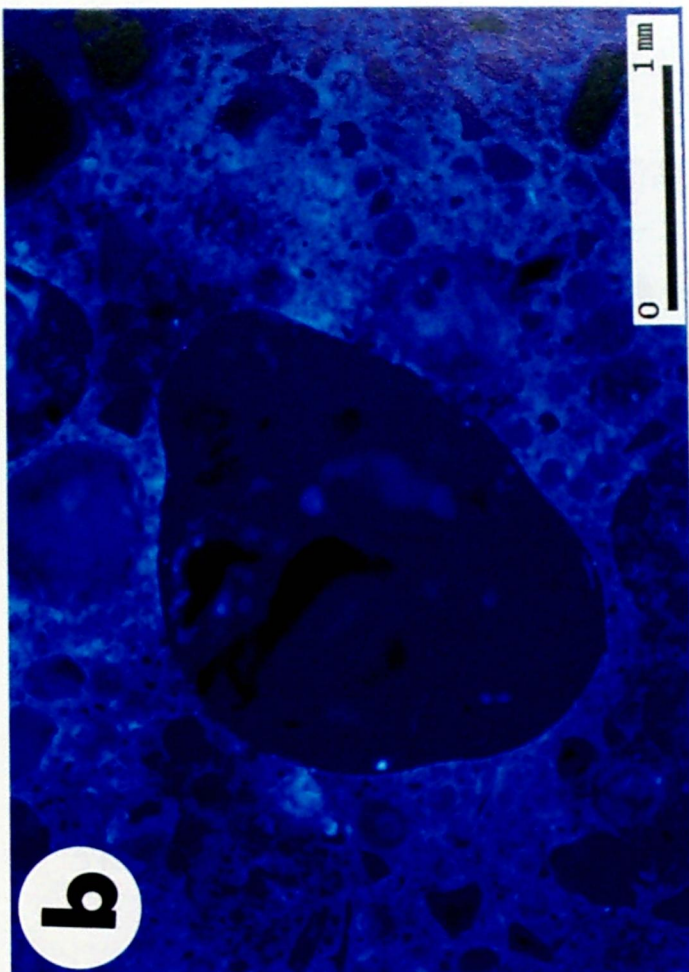
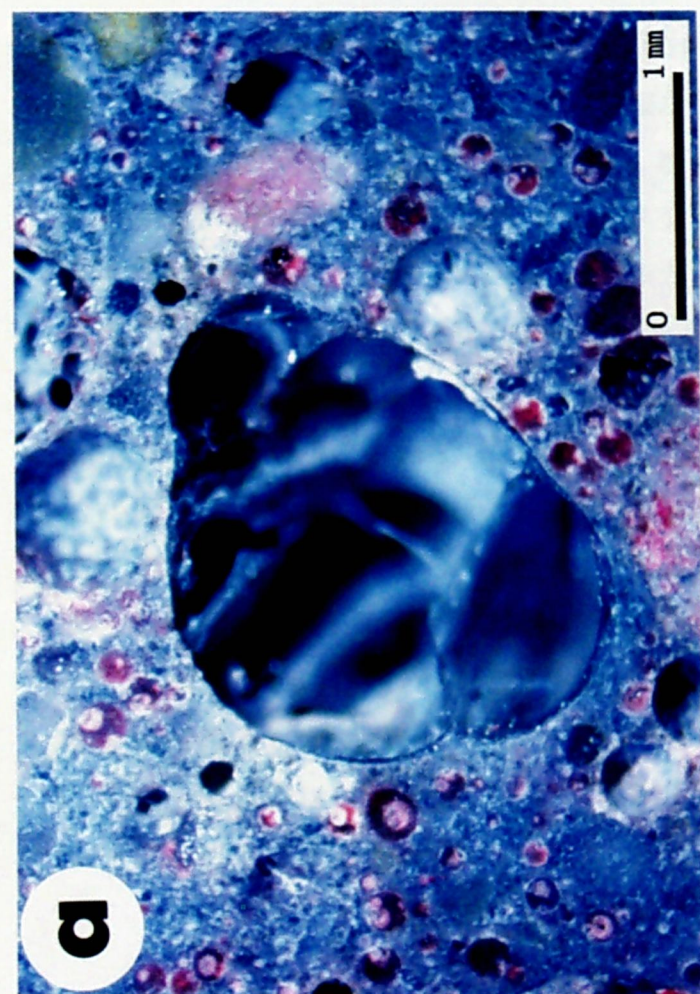


図9-2 減圧状態でメチルメタクリレートを充填した軽量骨材コンクリートの顕微鏡観察（試料No.2）  
（a:可視光, b:紫外線）



作製し、比較検討したところ、異なった現象が認められた。すなわち、図9-3aは減圧状態で、図9-3bは常圧で作製した試料を紫外線照射により観察したもので、いずれの場合もセメントペーストの部分にはメチルメタアクリレートが浸透している。しかし気泡の部分を見ると図9-3aではほとんどの気泡が樹脂で充填されているのに対し、図9-3bにおいては樹脂は気泡へ浸透していない。

軽量骨材（No.2）中の気泡については、先に述べたように減圧状態でもメチルメタアクリレートが十分に浸透していない部分が認められた。そこで、試料を切断し、切断面にシアノアクリレートを塗布することにより外部と連続していない気泡の可視化を試みた（図9-3c, d）。図9-3dにおいて青色に発光している部分は外部からメチルメタアクリレートが浸透した部分で、連続した気泡である。一方、黄色に発光している部分は切断後にシアノアクリレートが充填した部分で、外部とは連続していない独立した気泡と推測される。このように蛍光法では独立した気泡と連続した気泡とを樹脂の種類と浸透条件を変えることによって識別可能となる。

## 9. 5 軽量コンクリートの凍結融解に対する耐久性

樹脂の浸透がセメントペースト中の微細な間隙と気泡の部分とでは異なった挙動を示すことが明らかとなった。一方、凍結融解に対する耐久性に関する気泡の役割は、岡田ら<sup>9)</sup>によると、まずセメントペースト中の水の凍結膨張によって発生する氷圧により凍結していない水が気泡へと押し出され、氷圧が緩和されることによって、耐久性が向上すると考えられている（図9-4）。すでに述べたように、樹脂はセメントペースト中の微細な間隙へは容易に浸透するが、気泡では空気が満たされていると浸透しにくく、減圧すると初めて空気と樹脂とが置き換わるのが認められた。その理由としては、気泡の周囲には気泡剤やAE剤などの影響でセメントペーストの部分より浸透性が低くなっているか、あるいは樹脂の浸透によって気泡中の空気が封じ込められ、気泡内の圧力が上がるため充填が妨げられるものではないかと思われる。この現象は岡田らの考えを裏付けるものである。

また、軽量骨材中の独立した気泡と連続した気泡については、樹脂の浸透法を変えることによって識別されたが、当然のことながら独立し、吸水率に関係



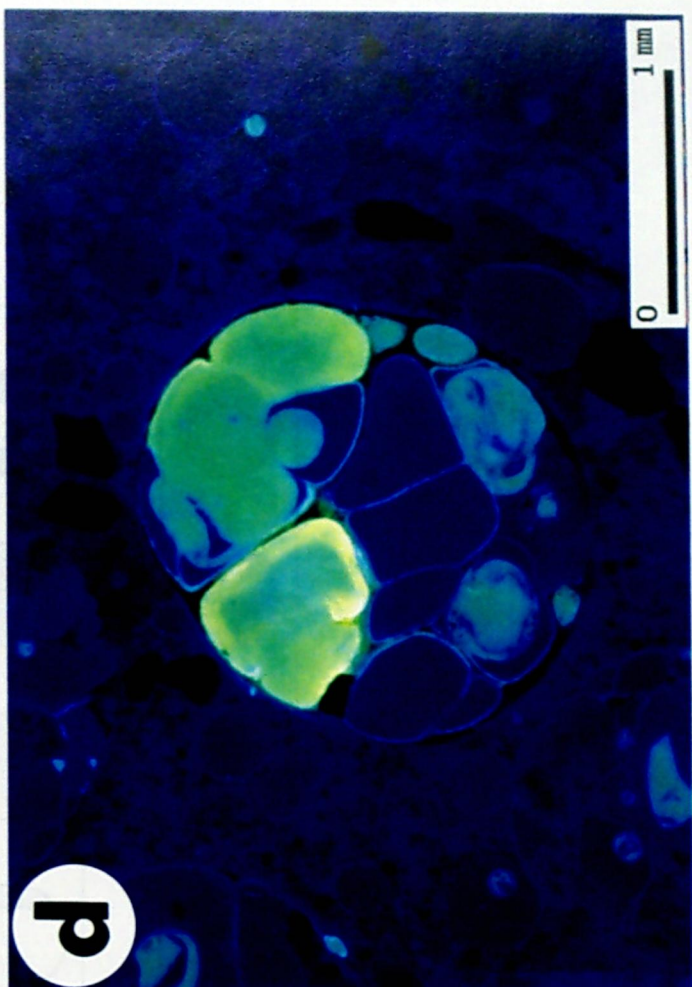
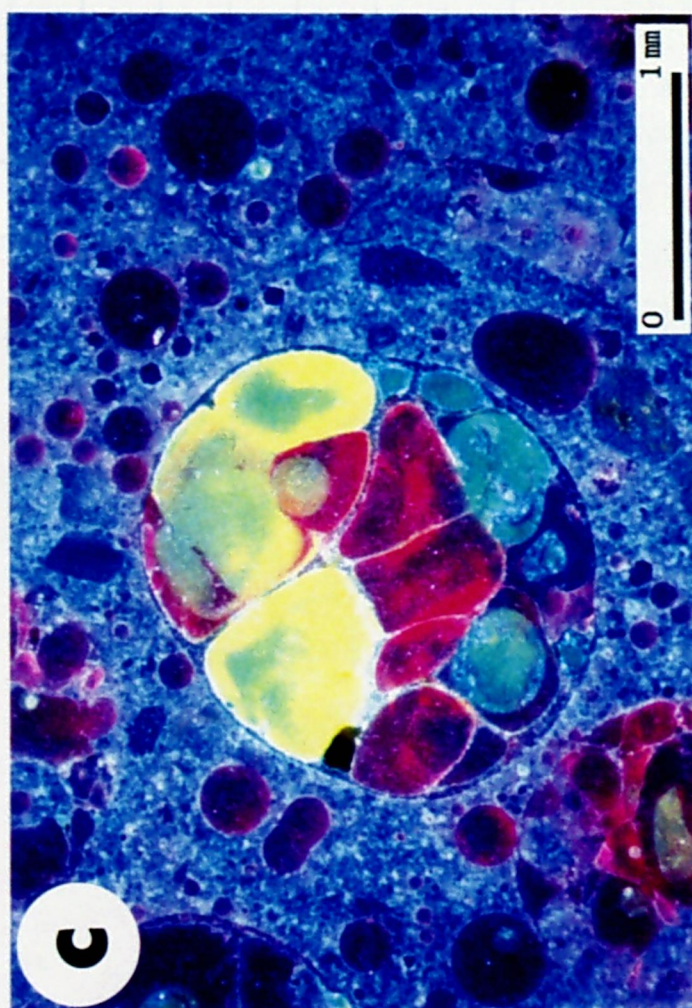
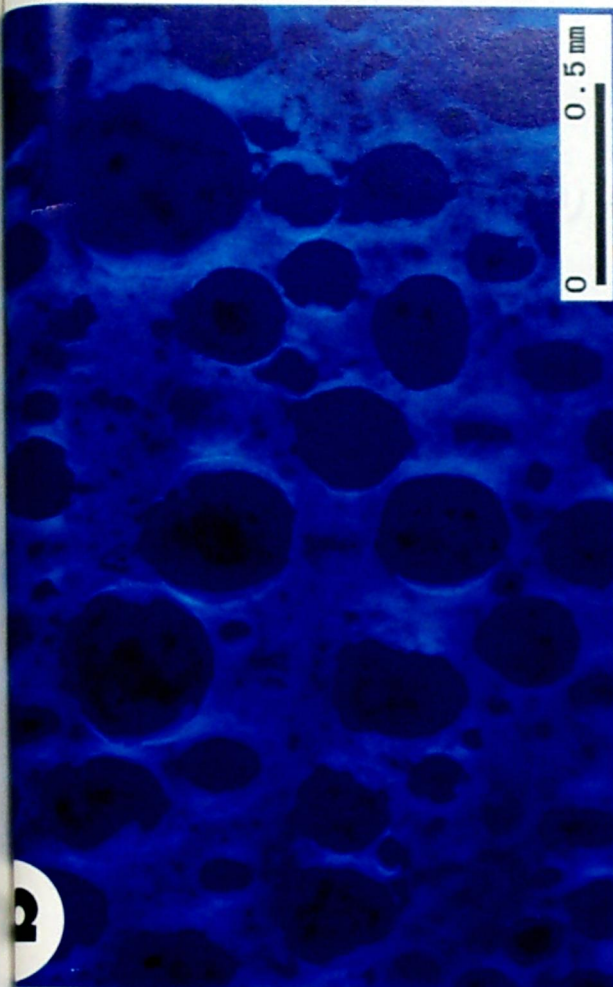
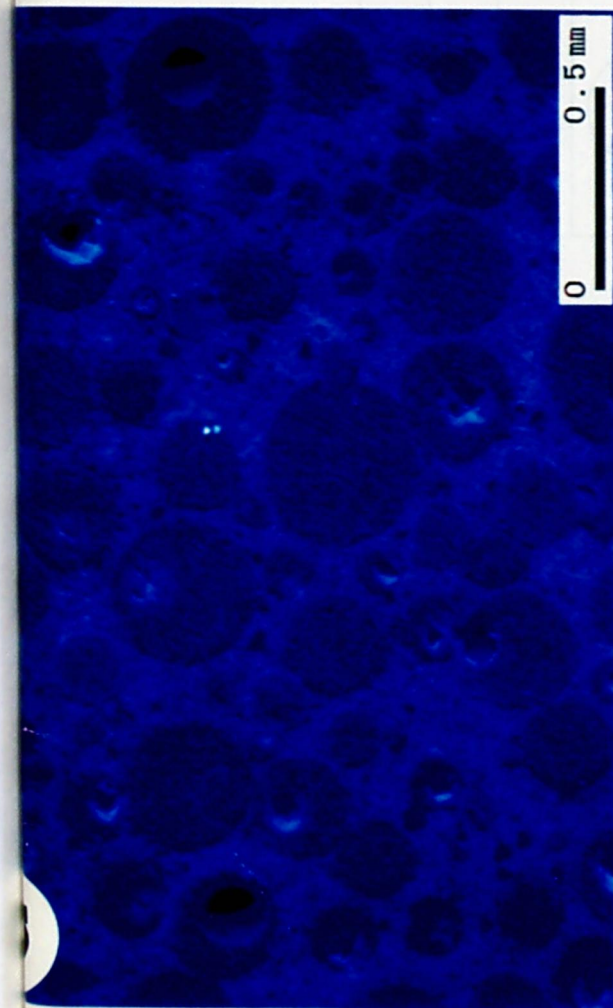


図9-3 減圧状態および常圧状態でメチルメタクリレートを充填させた試料の顕微鏡による観察

a: 減圧状態でメチルメタクリレートを浸透させた試料 (紫外線, 試料No.1)

b: 常圧状態でメチルメタクリレートを浸透させた試料 (紫外線, 試料No.1)

c, d: 減圧状態でメチルメタクリレートを浸透させた後、切断し、切断面にシアノアクリレートを塗布して作製した試料 (C: 可視光, D: 紫外線, 試料No.2)

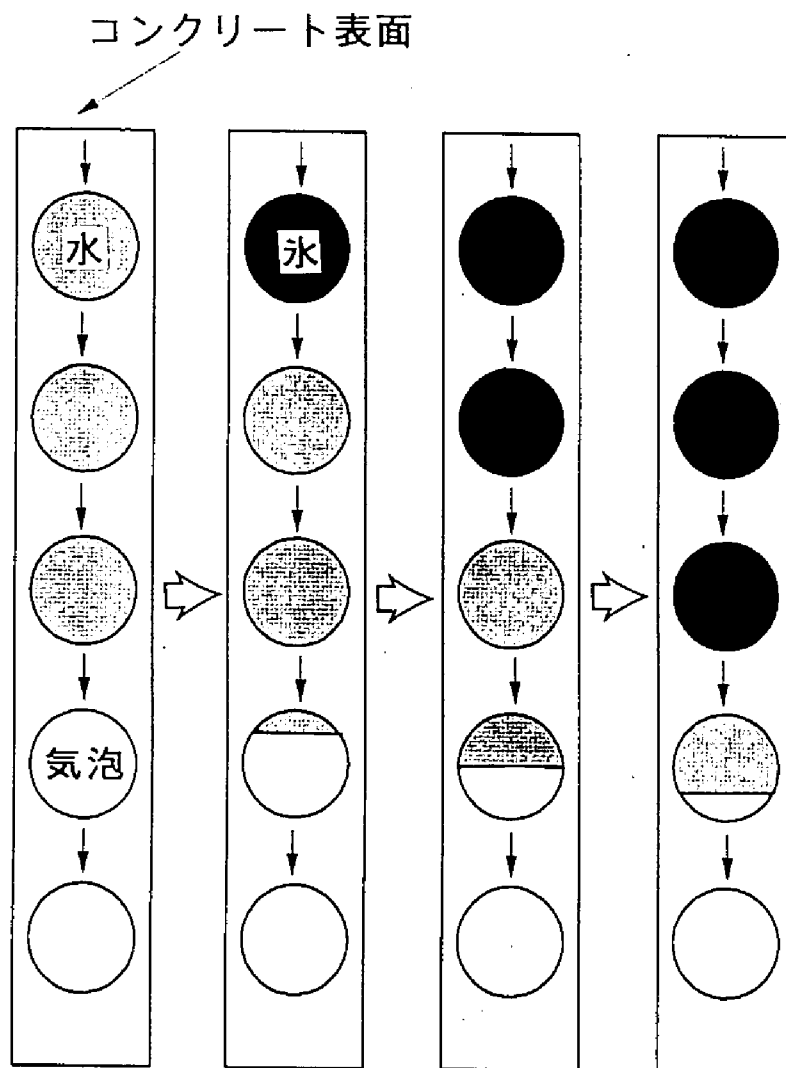


図9-4 凍結融解作用の機構（岡田，明石，小柳(1990)）<sup>9)</sup>



のない気泡が多いほど軽量骨材としては好ましいことになる。このことは、これまでの経験から、軽量骨材は軽く、かつ吸水率の小さいものが凍結融解の耐久性に優れているという報告<sup>9)</sup>とも一致している。

## 9. 6 画像処理

以上のことから、軽量コンクリートの耐久性を具体的に評価するためには、連続性のある気泡と独立した気泡を個別に扱い、その量を求める必要がある。コンクリート中の気泡の分布状況を定量的に評価するためには、ASTM C457で示されるリニアトラバース法や修正ポイントカウンタ法が一般的であるが、本研究では、まず気泡コンクリート中のすべての気泡にシアノアクリレートを充填させ、画像処理により気泡を抽出し、定量するという方法を採用した。その理由は、蛍光法と画像処理を併用する方法で求められる空気量はリニアトラバース法から得られる結果ときわめてよい一致を示すとともに（表 9-1）、この手法は多大な時間と労力を要するリニアトラバースに比べ、迅速かつ簡便に測定が可能であるという利点を有するとされているからである<sup>6)</sup>。そこで、軽量コンクリートに対しても画像処理による気泡の解析を行った。画像処理の手順は図 9-5 に示すとおりで、画像強調、エッジ保存平滑化、しきい値処理などの手法を組み合わせた。気泡のみを抽出した画像は図 9-6 の通りである。また、画像解析計算機能を利用すると、気泡の量を求めることができる。たとえば、図 9-6b のような画像では、気泡量は体積比に換算すると 52.9% となる。その他に、単位面積当りの気泡の個数、気泡の最大面積や等価円直径（面積値で等価円としたときの直径）などのパラメータを求めると表 9-2 のようになる。

一方、同じ試料について従来の測定方法により有効間隙率を求めると、減圧した状態では 77.1%、常圧では 36.5% となる（表 9-3）。先に述べたように、減圧した状態での有効間隙率は、セメントペースト中の微細な間隙と気泡とを合わせたものであり、常圧での有効間隙率はセメントペースト中の間隙のみを表していると推察されるので、気泡による間隙率はそれらの差、すなわち 40.6% となる。一方、画像処理により求めた気泡量は 52.9% であり、有効間隙率から推定した値の 1.3 倍で、ほぼ一致しているとみなされる。



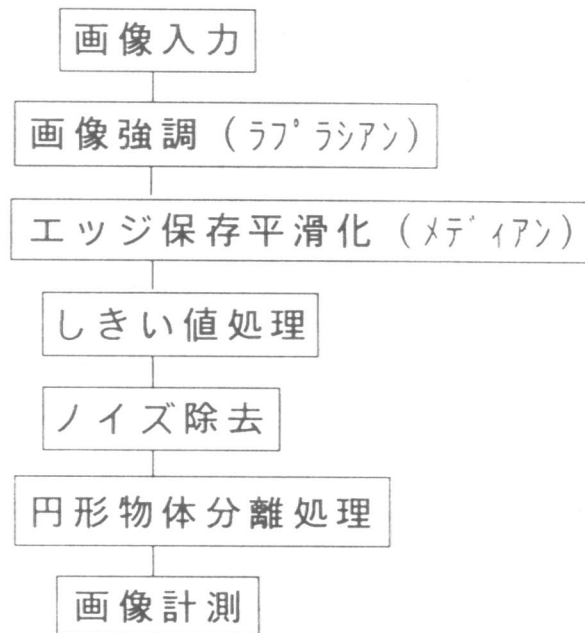


図9-5 画像処理フロー

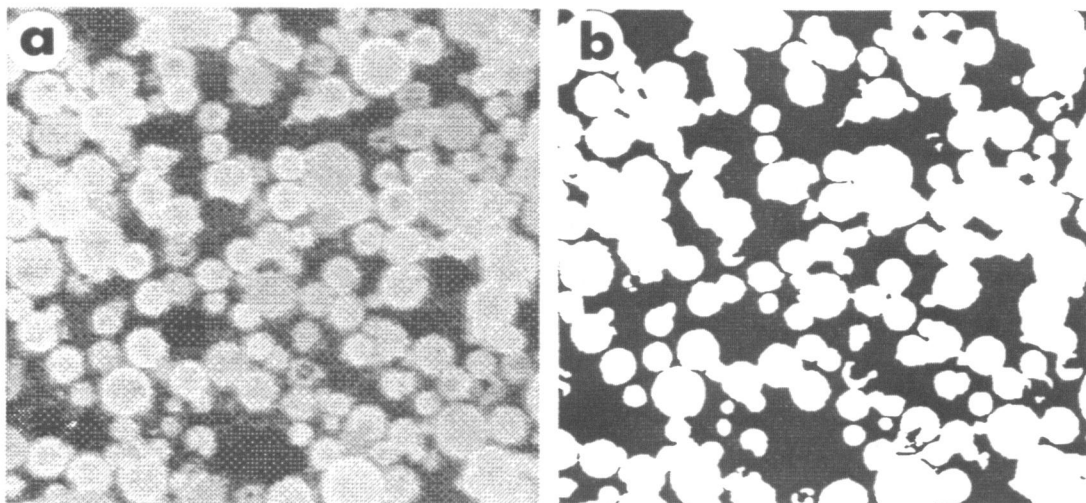


図9-6 画像処理によって得られる画像（試料No.1）

a:紫外線を照射して入力した濃淡画像, b:抽出された気泡の2値画像

表 9-1 画像処理法とリニアトラバース法による空気量の測定結果の比較  
(Nishiyama et. al., (1988)) 6)

試 料	No. 1-1-1	No. 2-1-1	No. 4-1-1
染色による画像処理法 (%)	0.9	1.9	10.8
リニアトラバース法 (%)	0.9	1.9	9.3

表 9-2 画像処理結果

	気泡量 (面積%)	気泡量 (体積%)	気泡数 (個/mm <sup>2</sup> )	気泡の平均 面積 (mm <sup>2</sup> )	気泡の最大 面積 (mm <sup>2</sup> )	気泡の平均 等価円直径 (mm)	気泡の最大 等価円直径 (mm)
No.1	65.4	52.9	7.5	0.06	0.37	0.27	0.61
No.2	58.4	44.6	2.7	0.19	1.81	0.38	1.52

表 9-3 従来の方法で測定した  
有効間隙率

	有効間隙率 (%)
常圧で測定	36.5
減圧で測定	77.1

## 9.7 水と樹脂の浸透性の比較

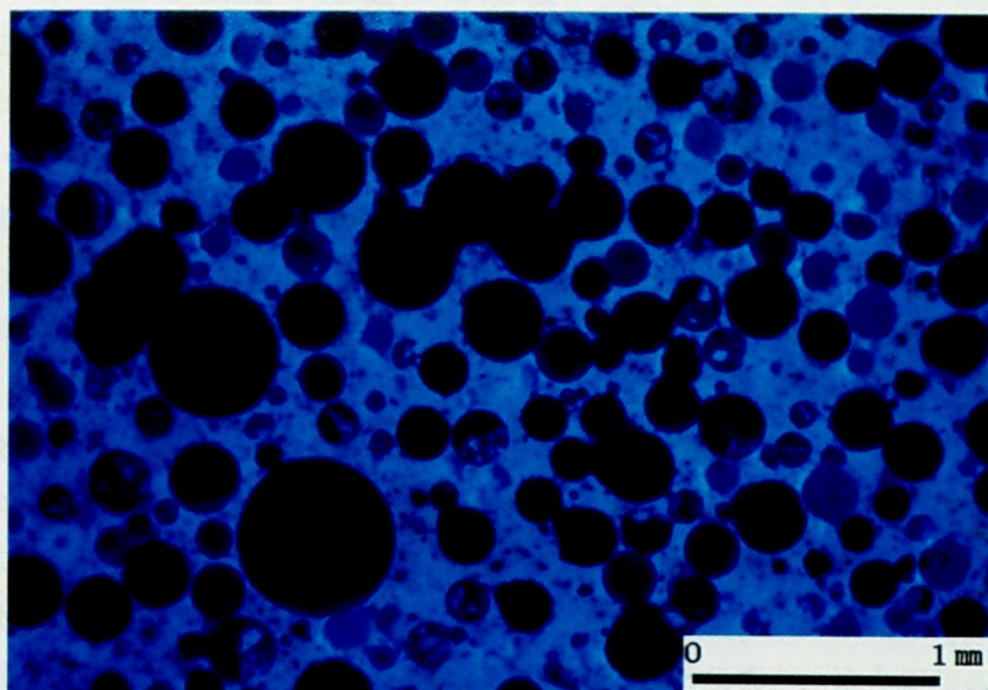


図9-7 水溶性の蛍光剤を浸透させた試料の顕微鏡観察（紫外線，試料No.1）

## 9.8 結言

質量コンタリート中の気泡や空隙の計測を明らかにするために、蛍光剤を塗料を添加した樹脂を質量コンタリートおよび軽金属材コンタリートに充填し、気泡や空隙を可視化し、評価を行った。まず、質量コンタリート中の気泡については、ペースト中の樹脂が硬化する際に、部分的な高い粘度で、ある気泡は樹脂が充填されにくい空隙にあつたことが判明した。また、軽金属材中の気泡は樹脂の浸透性を高めることによって外部と連通したものと孤立したものとは区別できることも明らかになった。さらに、蛍光法と顕微鏡法を併用することにより気泡の量や形状と母材に定量的に把握することが可能となった。今後、耐摩耗性塗料の実用評価と関連づけることにより質量コンタリートの有効な評価法への応用が期待される。

## 参考文献

1. 日千幸、佐・横田英治・AICの炭化水素系と軽金属材評価法に関する一研究、第4回セメント技術大会講演要旨、473-481、(1990)
2. 日千幸・横田英治・神谷昌彦、軽金属材の耐摩耗性に関する研究の進展

## 9. 7 水と樹脂の浸透性の比較

以上の実験は2種の樹脂と3通りの充填方法を使い分けて軽量コンクリート中の気泡の性質を調べたものであるが、水と樹脂では表面張力も異なり、水についても樹脂と同様の浸透現象が起こっているかどうかが問題である。水の場合は樹脂のようにうまく蛍光剤を固定する方法がないので、概略の傾向をみるために水に溶ける蛍光剤を試料に浸透させて同様の実験を行ってみた。図9-7は紫外線照射により観察したもので、セメントペースト部分の小さな間隙に浸透した水に含まれていた蛍光剤が残留し、発光しているものと思われる。一方、比較的大きな間隙である気泡では水が充填されていたか、あるいは充填されていなかったかを判定する基準はみつからない。しかしながら、すでに述べたように、従来の方法により推測された気泡の量と画像処理によって求められた気泡量との間には比較的よい一致が得られていることと、微細な間隙において水と樹脂が類似した挙動を示していることを考え合わせると、水と樹脂の浸透現象には大きな差はないと考えられる。

## 9. 8 結言

軽量コンクリート中の気泡や間隙の状況を明らかにするために、蛍光剤や染料を添加した樹脂を気泡コンクリートおよび軽量骨材コンクリートに充填し、気泡や間隙を可視化し、評価を試みた。まず、セメントペースト中の気泡については、ペースト中の微細な間隙は樹脂が充填されるが、比較的大きい間隙である気泡は樹脂が充填されにくい状況にあることが判明した。また、軽量骨材中の気泡は樹脂の浸透法を変えることによって外部と連続したものと独立したものとに区別できることも明らかになった。さらに、蛍光法と画像処理を併用することにより気泡の量や形状を容易に定量的に把握することが可能となった。今後、耐凍害性能の実用評価と関連づけることにより軽量コンクリートの有効な評価法への応用が期待される。

## 参考文献

- 1) 千歩 修・鎌田英治：ALCの凍害劣化メカニズムと耐凍害性評価法に関する研究，第44回セメント技術大会講演集，478-481，(1990)
- 2) 中村雅彦・大西孝明・神谷昌岳：無機建材の耐凍害性に関する細孔の定量



- 形態学的解析, 日本セラミックス協会学術論文集, 89[11], 37-42, (1991)
- 3) 楠田 啓・西山 孝・本居孝治: 蛍光法による間隙および気泡の可視化と  
軽量コンクリート評価への応用, 建設用原材料, 2[2], 36-39, (1992)
- 4) 本居孝治・楠田 啓・西山 孝: 蛍光法による気泡コンクリート中の気泡  
の観察と評価, 第46回セメント技術大会講演集, 720-723, (1992)
- 5) 楠田 啓・西山 孝・本居孝治: 蛍光法による軽量コンクリート中の気泡  
の可視化と評価, 資源・素材学会秋季大会分科研究会資料, T, 9-10,  
(1992)
- 6) Nishiyama, T., Maekawa, S., Kusakabe, Y. and Nakano, K. : Staining and  
Observation of Air-Void Systems in Hardened Concrete Using Cyanoacrylate,  
CAJ Review, 170-171, (1988)
- 7) 西山 孝・前川慎喜・楠田 啓・北川元紀・中野欽一: 染色したコンクリ  
ートの画像処理による観察, セメントコンクリート論文集, 590-593,  
(1989)
- 8) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀: 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目  
の視覚化と自動抽出, 資源と素材, 106[10], 573-579, (1990)
- 9) 岡田 清・明石外世樹・小柳 洽 編: 土木材料学, 国民科学社, (1987)

## 第 10 章 結論

本研究では、岩石やコンクリートなどに存在する割れ目や間隙を可視化し、定量的に測定し評価する方法について考察した。割れ目や間隙の可視化には、蛍光剤や染料を添加した樹脂を充填させる方法と、特定の鉱物を選択的に染色する方法を開発した。評価には画像処理法を用いて割れ目や間隙を抽出し、形状、大きさ、密度などの特性を定量的に測定した。研究対象には風化、経年変化、アルカリ骨材反応、凍結融解などの諸現象のみられる岩石やコンクリートを選び、これまで識別の困難であった割れ目や間隙を顕在化し、これらの現象の解明、劣化の評価について論及した。

本研究から得られた主な成果を要約すると以下の通りである。

### (1) 岩石やコンクリートの微細な割れ目や間隙を可視化する方法

#### (a) 割れ目や間隙の可視化

岩石やコンクリート中の微細な割れ目にあらかじめ蛍光剤や染色剤を添加した樹脂を浸透、固化させた後に、紫外線を照射することにより、これまで観察できなかった極めて微細な割れ目や間隙を可視化した。樹脂にはシアノアクリレートとメチルメタアクリレートの2種を用い、充填方法は試料表面に塗布する方法と、減圧状態あるいは常圧状態で試料外部から浸透させる方法を開発した。その結果、割れ目や間隙の少ない新鮮な試料から、土壌に近いような脆い試料まで、樹脂を充填させることが可能となった。この方法により数 $\mu\text{m}$ 程度までの割れ目や間隙が観察できる。

また、コバルチ亜硝酸ナトリウムとカリウムとの反応を用いると、カリ長石の染色が可能となり、カリ長石の色別により、その形状や大きさの変化などが判定できる。

#### (b) 可視化された割れ目や間隙の画像処理

画像処理法による割れ目や間隙の解析には、輝度値のヒストグラム情報を利

用して画像を鮮明にする方法、フィルター処理などにより割れ目や間隙を強調する方法、しきい値処理により目的部分のみを抽出する方法、処理中に消失あるいは変形した部分をもとの形に補正する方法などが有効である。さらに、画像解析機能を用いると、抽出された画像から必要な情報を迅速に得ることができる。

なお、蛍光法で得られる画像は、一般に目的とする割れ目や間隙とその他の部分との輝度差が大きく、画像処理は容易である。

## (2) 花崗岩中の割れ目や間隙

### (a) 花崗岩中の間隙や割れ目の発達状況の評価

風化の程度の異なる花崗岩試料について、割れ目の状況と鉱物粒子にみられる変化について検討した。その結果、画像処理によって測定された単位面積当りの割れ目の長さと有効間隙率との間には風化の初期の段階ではよい相関関係がみられるが、ある値（有効間隙率6%）を超えると、割れ目の長さとの相関性がなくなる。このことは、間隙率の増加は最初は割れ目の長さに依存し、ある段階をすぎると長さよりも幅に依存するようになると推察される。また、吸水率から推定される一軸圧縮強度と割れ目長さとの間には負の相関関係が認められた。さらに、鉱物粒子の風化の進展は長石が最も早く、石英はもっとも遅い。黒雲母は両者の中間的存在である。

### (b) 染色法によるカリ長石の風化機構の考察

花崗閃緑岩中のカリ長石を染色し、風化に伴うカリ長石の形状や大きさの変化を画像処理により定量的に測定した。カリ長石は風化が進行するにつれて、粒子の平均面積、平均周囲長は減少し、形状は複雑になり、数は増える。さらに、風化が進むと、逆に形状は単純に、数は減少し、消滅することが判明した。

## (3) 凝灰岩の経年変化によって発生する割れ目や間隙

凝灰岩の経年変化を蛍光法により観察すると、おもに機械的風化作用による割れ目の形成とおもに化学的風化作用による漸移的風化作用が区別され、それらの段階的に進展している風化作用がとらえられた。また、風化が進むと、形

成された割れ目に種々の溶解物質が沈積し、割れ目が充填されていく過程が明らかになった。さらに、画像処理により求めた一定面積における平均輝度値と、吸水率、有効間隙率、P波伝播速度、および吸水率あるいはP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度との間にはよい相関性が認められ、風化の指標として利用できることが示唆された。

#### (4) コンクリートの経年変化による割れ目や間隙

蛍光法と画像処理法を併用することによって、これまで確認の困難であったコンクリートの経年変化による微細な割れ目が可視化され、分布状況、発展状況が明らかになった。経年変化したコンクリートには顕在化した割れ目の他に多数の微細な割れ目が潜在しており、これらはコンクリートの劣化に直接関連しているものと推察される。また、画像処理によって求められた割れ目の量および長さやP波伝播速度、あるいはP波伝播速度から推測される一軸圧縮強度との間にはよい相関性が認められた。

#### (5) アルカリ骨材反応によってコンクリート中に発生する割れ目や間隙

##### (a) チャート質骨材のアルカリ骨材反応

アルカリシリカ反応を起こしたチャート質骨材試料について、染色法によりアルカリシリカ反応の発生状況を調べた。その結果、種々の形状のクラックや反応生成物が観察された。また、これら顕微鏡で認められる劣化現象は、X線回折線の $d=0.91597\text{ \AA}$ と $d=0.91508\text{ \AA}$ から導かれる指標ともつともよく一致していることが明らかになった。

##### (b) フェロニッケルスラグのアルカリ骨材反応

蛍光法および染色法によりフェロニッケルスラグのアルカリ骨材反応性について検討した。その結果、画像処理により求めたモルタルバー試験片中の割れ目の長さは膨張量との間に相関性が認められた。また、その他の反応性試験や構成鉱物種を総合的に判断すると、フェロニッケルスラグを骨材として使用するためには、スラグをゆっくり冷却する必要があると考えられた。



#### (6) 軽量コンクリートの気泡や間隙

軽量コンクリートについて、異なる充填法により作製された試料を作製し、顕微鏡観察から耐凍害性能と強く関連している気泡や間隙の状況を明らかにした。まず、気泡コンクリートにおける気泡はセメントペースト中の間隙に比べると樹脂が充填されにくい状況にあることが、また、軽量骨材中に存在する間隙には外部と連続したものと独立したものとがあることが明らかになった。さらに、画像処理を併用すると気泡の量や形状を容易に定量的に解析することも判明した。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、終始御懇篤な御指導と御示唆を賜った京都大学工学部教授菊地宏吉博士、同教授西山 孝博士、元京都大学工学部教授日下部吉彦博士に深く感謝の意を表します。また、この間、身に余る御激励をいただいた京都大学工学部資源工学教室の諸先生方に厚く御礼申し上げます。さらに、貴重な試料を提供していただいた関西大学工学部教授西田一彦博士、神戸大学工学部助教授沖村 孝博士、および四国総合研究所、大阪セメント株式会社、大平洋金属株式会社、積水化学工業株式会社、日本地科学社、東亜合成化学工業株式会社の方々に感謝の意を表します。

本研究における数々の実験は、京都大学工学部資源工学教室応用地質学講座の大学院生や学生諸氏の御協力によって実施したものである。ここに記して謝意とする。